



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Jaan Vagula

**TEENÕLVAKATTE EROSIOONISIMULAATORI
PROJEKTEERIMINE JA KATSETAMINE**

**CONSTRUCTING AND TESTING OF A ROAD
EMBANKMENT EROSION SIMULATOR**

Magistritöö
Vesiehituse ja veekaitse õppekava

Juhendaja: dotsent Toomas Tamm

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Jaan Vagula		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Teenõlvakatte erosioonisimulaatori projekteerimine ja katsetamine			
Lehekülgi: 82	Jooniseid: 40	Tabeleid: 7	Lisasid: 9
Osakond / Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tehnikateadused T220	
Juhendaja(d):		dotsent Toomas Tamm	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu, 2018	
<p>Sademetest poolt põhjustatud pinnase erosioon on aktuaalne teede ehitus valdkonnas. Teeäärseid nõlvad võivad olude sunnil muutuda väga järskudeks, kuni 1:1 nõlvuseni. Suuremate nõlvuste korral on pinnaseerosiooni tekke risk kõrgem, nõlvakattematerjali omadustel on suur roll pinnase erosiooni tekkel.</p> <p>Käesoleva töö eesmärgiks oli projekteerida, ehitada ja katsetada teenõlvakatte erosioonisimulaator 2 x 0.6 meetrisele reguleeritavale nõlvale labori tingimustes. Koos erosioonisimulaatoriga ehitati laborisse ka vihma-simulaator. Konstrueeritud vihma-simulaator töötab solenoidklapi abil ning on võimeline tekitama kunstvihma intensiivsusega 0,47 kuni 2,31 mm/min. Erosioonisimulaatoriga on võimalik uurida sademete mõju erinevate teenõlvakatte materjalidele, eelkõige on simulaator mõeldud nõlval tekkiva pinnase erosiooni protsesside uurimiseks. Erosiooni protsesse on antud seadmega võimalik uurida pinnavee, vaheäravoolu ning drenaažikihtidest välja voolava vee hulga analüüsi teel.</p> <p>Antud töös katsetati nõlvakatte materjalidena kahte väga erinevate omadustega reoveesetekomposti. Katsete põhjal teostati analüüs ning anti hinnang materjalide sobivusele nõlvakattematerjalidena kasutamiseks. Tulevikus on simulaatoriga võimalik katsetada erinevate nõlvakatte materjalide erosiooni ning veeläbilaskvust.</p>			
Märksõnad: Vihmutus, vihma-simulaator, erosioon, erosioonisimulaator, kompost, teenõlv			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Jaan Vagula		Curriculum: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Constructing and testing of a road embankment erosion simulator			
Pages: 82	Figures: 40	Tables: 7	Appendixes: 9
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERC S) code:		Technological sciences T220	
Supervisors:		docent Toomas Tamm	
Place and date:		Tartu, 2018	
<p>Water erosion caused by rainfall is an actual topic in road construction. Road embankments can become as steep as 1:1 under certain circumstances. With larger slopes, the risk of surface erosion is higher.</p> <p>The purpose of this thesis was to design, construct and test a road embankment erosion simulator for a 2 x 0,6 meter changeable slope in laboratory environment. For the erosion simulator, a rainfall simulator was also constructed. The rainfall simulator operates with a solenoid valve and can achieve rainfall intensities between 0,47 mm/min to 2,31 mm/min. Different road embankment surface materials can be researched using the erosion simulator, mostly the simulator is meant to investigate surface erosion processes caused by rainfall on slopes. Analysis is performed with measuring water flow rates from surface runoff, interflow and drainage layers.</p> <p>In this thesis, two rather different road embankment surface materials were tested. Analysis was performed based on results gathered from experiments and soils were evaluated in using for road embankment material. In the future the simulator can be used to test different road embankment slope surface materials for erosion and water conductivity.</p>			
Keywords: Irrigation, rainfall simulator, erosion, erosion simulator, compost, embankment			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. VIHMASIMULAATOR.....	8
1.1. Maailmas konstrueeritud vihasimulaatorid	8
1.2. Vihasimulaatorite liigitus	8
1.2.1. Rõhuga düüsidega (<i>pressurized nozzle</i>) vihasimulaatorid	9
1.2.2. Valencia vihasimulaator	9
1.2.3. Vihasimulaator koos erosioonisimulaatoriga	10
1.2.4. Vihasimulaator, kus rõhuga düüsid kombineeritud vahekraaniga.....	11
1.2.5. Padoa Ülikooli rõhuga düüsidega vihasimulaator	13
2. VIHMASIMULAATORI PROJEKTEERIMINE JA EHITAMINE	15
2.1. Simulaatori vihmaintensiivsuse projekteerimine.....	16
2.2. Kasteraadiuse määramine	19
2.3. Simulaatori kandevkonstruktsioon	21
2.4. Vihasimulaatori varustamine veega, toruarmatuur.....	23
2.4.1. Sõlm solenoidklapi ning veearvestiga	25
2.5. Kunstvihma ühtlase jaotuse koefitsient	26
3. VIHMASIMULAATORI KATSETAMINE.....	27
4. SADEMETE PÕHJUSTATUD PINNAEROSIOON	30
4.1. Reoveesette kasutamine nõlvakattematerjalina	31
5. EROSIONISIMULAATORI PROJEKTEERMINE JA EHITAMINE.....	32
5.1. Kasutatavate pinnaste parameetrid	36
5.1.1. Aluspinnase terastikuline koostis	37
5.1.2. Pinnaste mahumasside, poorsustegurite ja küllastusastmete määramine	38
5.1.3. Pinnaste veejuhtivuse määramine.....	39
5.2. Drenaažikihi projekteerimine	44
5.2.1. Geotekstiili ummistuskindlus	46
5.2.2. Geotekstiili veeläbilaskvus	47
5.3. Dreenikihi geokomposiit StabiDrain	47
6. EROSIONISIMULAATORI KATSETAMINE.....	50
6.1. Aluspinnase katsed	52
6.2. Anaeroobselt kääritatud kompostmaterjali katsed.....	55
6.3. Aunkompostmaterjali katsed	59
6.4. Kattematerjalide katsetulemuste analüüs.....	62
KOKKUVÕTE	65
KASUTATUD KIRJANDUS	67
LISAD	69
Lisa 1. Vihasimulaatori raami materjalide loetelu.	70
Lisa 2. Toruarmatuuri loetelu.	71
Lisa 3. Ühtlase jaotuse leidmise katseraport ning joonis.....	72
Lisa 4. Aluspinnase erosioonisimulaatori katsed.	73
Lisa 5. Vihasimulaatori katsetulemuste koondtabel.	74
Lisa 6. Tegelik intensiivsuse leidmine, veekao arvutamine.	75
Lisa 7. Erosioonisimulaatori katsetulemused, Anaeroobselt kääritatud kompost.	76
Lisa 8. Erosioonisimulaatori katsetulemused, aunkompost.....	79
Lisa 9. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	82

SISSEJUHATUS

“Erosioon ehk uuristus on voolava vee, liustike, tuule või lainete tekitatud kulutus, mille tagajärjel osa pinnasest ära kandub.” (Keskkonnasõnaraamat 2004 s.v. erosion). Üldiselt jagunevad erosiooni põhjustavad tegurid järgmiselt: vesi, lumi, jää, õhk (tuul), organismid (taimed, loomad) ning inimene (Zachar 1982). Erosioon võib olla loodusliku tekkega või inimtekkeline, viimane on üldjuhul tekitatud intensiivsest põllumajandusest, kuid esineb sageli ka rajatiste juures, näiteks kraavinõlvadel ja teedenõlvadel. Üldiselt käsitletakse erosiooni kui negatiivset nähtust, mille käigus tekivad maapinna muutused ja kantakse ära osa pinnase materjalist, mis võib põhjustada nii mehaanilisi takistusi kui reostust erodeeritud materjali uues paiknemiskohas.

Erosiooniprotsessid võib jaotada kolmeks: eraldamine, transport ja settimine. Eraldamise käigus pinnaseosakesed eemaldatakse pinnasest välistegurite toimel. Transpordi käigus eraldatud osakesed liigutatakse tuule või vee mõjul edasi ning settimisel eraldatud pinnaseosakesed jäävad paigale uues asukohas, kui liikumise energia on kahanenud.

Üks tähtsamatest erosiooni tekitajatest on vesi, mistõttu räägitakse eraldi vee-erosioonist. Vee-erosioon tekib vee liikumise tagajärjel pinnase peal ja läbi pinnase. Levinuimaks ning silmaga nähtavaim vee-erosioon on tekitatud sademete poolt. Erosiooni tekkimise tõenäosus sõltub sademete intensiivsusest ja mööda pinda valguva vee voolutee pikkusest. Kui pinnas ei suuda enam suurema intensiivsusega vihma vastu võtta, tekib pindmine äravool ning koos veega kanduvad ka pinnase osakesed erosiooni tekkekohast eemale. Lisaks intensiivsusele mõjutab erosiooni teket ka langeva veetilga kineetiline energia kokkupuutel maapinnaga. Tilga kineetiline energia sõltub nii tilga langemise kiirusest kui massist, seetõttu suudavad suuremad tilgad lüüa pinnaseosakesi palju rohkem lahti. Samuti on pindmine äravool intensiivsem nõlvuse suurenemisel. Eestis on Riigi Ilmateenistuse andmetel suurimad vihma intensiivsused mõõdetud 23. juulil aastal 1957 Toomal väärtustega 3,6 mm/min kolme minuti jooksul ning 2,3 mm/min 10 minuti jooksul (Riigi Ilmateenistus 2018). Arvestades neid andmeid peaks Eesti mõistes erosiooniuuringutes kasutama vähemalt samaväärseid intensiivsusi.

Erosiooni uurimiseks on mitmeid võimalusi, näiteks teostada vaatlusi reaalsetel objektidel, mõõtes nii sademeid kui tekkivaid vooluhulki ning erosiooni suurust. Enamasti üritatakse kas väli- või laboritingimustes tekitada kindla intensiivsuse ja omadustega vihm uuritavate pindade kohal. Selleks eesmärgiks ehitatakse erosioonisimulaatoreid. Erosioonisimulaator on seade mis koosneb kahest osast, vihmasimulaatorist ning reguleeritava nõlvusega nõlvaseadest. Simulaatoriga on võimalik uurida erinevate nõlvakatte materjalide käitumist intensiivsete sademete korral, materjali veeläbilaskvust ning pinnase erosiooni tekkimist. Samuti on võimalik mõõta millised vooluhulgad tekivad sademetest mööda pinda ning eri pinnaste kihtides. Erosiooni tekke uurimiseks on vaja suure intensiivsusega vihma, mida looduslikes tingimustes on raske uurida, sest suurte intensiivsustega sajud võivad olla väga harva esinevad ning lühiajalised. Vihmasimulaatori abil on võimalik tekitada aga erineva intensiivsuse ning kestvusega vihma ja nõlvaseadme abil saab tekitada tingimused, mis vastaksid reaalsele olukorrale maastikul.

Käesoleva magistritöö eesmärk oli konstrueerida erosioonisimulaator koos vihmasimulaatoriga laboratoorsetes tingimustes kasutamiseks ning seadme abil uurida erinevaid erosiooniprotsesse. Teema on aktuaalne teedehituse valdkonnas, kus tee muldkeha suurte nõlvuste korral tekib oht pindmise äravoolu poolt põhjustatud erosiooni tekkeks.

Erinevaid vihmasimulaatoreid on loodud ka Eesti Maaülikooli veemajanduse osakonnas ka varem, kuid seni pole ehitatud laborisse suuremõõtmelist seadet, millega saaks tekitada reaalsetele nõlvadele sarnaseid olukordi. Töö lähteülesandes on alljärgnevad punktid :

- projekteerida ja konstrueerida vihmasimulaator vihmaintensiivsusega kuni 2,3 mm/min vähemalt 2m pikkusele ja 60cm laiusele nõlvale;
- projekteerida ja konstrueerida muudetava nurgaga nõlva aluskonstruktsioon (kuni 1:1 nõlvusega), millele saab asetada nõlva pealmise kihi katsekeha;
- testida vihmasimulaatori veejaotust ja vajadusel seadistada ühtlase sademete saavutamiseks (*coefficient of uniformity*);
- projekteerida ja konstrueerida nõlva kastekeha (konstruktsioon, mis omab drenivat kihti ja selle paigaldatavat nõlva alusmaterjali ja kattematerjali kihti);
- katsetada nõlva katsekeha, et määrata infiltratsioonivõime, mööda nõlva pindmine äravool ja teha kindlaks erosiooni tekkimise olukorrad erineva nõlvakalde korral;

- koostada katsete ja katsetulemuste raport ja anda hinnang pinnaste kasutamise sobivuse kohta teemullete nõlvadel.

Töö valmimise eest tahaksin tänada juhendajat dots. Toomas Tamme. Vajalikud vihmudid tarnis Taavi Lulla, kes nõustas ka vihmutite paigaldamisel. Erosioonisimulaatori metallkonstruktsiooni aitas konstrueerida ning ehitada Andreas Mänd, projekteerija ettevõttest AV Group OÜ. Solenoidklapi ning kontrolleri konstrueeris simulaatorile Morten Poolakese. Erinevaid geokomposiite drenaažikihi projekteerimiseks aitasid tarnida Janek Heim ettevõttest Viacon Eesti AS ning Mario Piir ettevõttest HydroSeal OÜ.

1. VIHMASIMULAATOR

1.1. Maailmas konstrueeritud vihasimulaatorid

Vihmasimulaatoreid on konstrueeritud paljude erinevate teemade uurimiseks. Mõned olukorrad, kus vihasimulaatorite abil on võimalik erinevaid protsesse uurida on näiteks alljärgnevad (Hudson 1993) :

- erinevate taimestiku tiheduste juures tekitatav suhteline pinnase kaitstus;
- erinevate kasvufaaside puhul tekitatav suhteline pinnase kaitstus;
- suhtelise erodeeritavuse uurimine;
- pinnaste infiltratsiooni uurimine;
- erosiooni ning äravoolu uurimine erinevatel nõlvustel.

Laialdast kasutust on vihasimulaatorid leidnud erosiooniprotsesside uurimisel looduses või laboris, eriti otstarbekalt saab simulaatorite abil kvantifitseerida materjali ärakannet (Cerdá 1999). Olenevalt simulaatori ehitusest on võimalik kiirelt ja mugavalt seadet transportida ning üles seada mujale. On ka simulaatoreid, mis on ehitatud kasutamiseks laboris ja seadme transporditavus pole oluline.

Euroopas on vihasimulaatorid konstrueeritud ja katsetatud juba aastast 1938, teadaolevalt üle 100 simulaatori mille katsealad jäävad alla 5 m², valdavalt alla 1 m² (Iserloh et al. 2013). Kuna simulaatorite ehitus ja funktsioneerimine pole normeeritud, erinevad maailma vihasimulaatorid disaini, vihma intensiivsuste, kunstvihma jaotuse, tilga suuruste ja tilga kukkumise kiiruste poolest. Samuti on seadmete juures väga oluline ühtlaste sademete saavutamine (*coefficient of uniformity*). Välja toodud simulaatorite ühtlase jaotuse protsent varieerub 60,6 ja 97,8 vahel. Saadud uurimistulemused on olulise tähtsusega, et aru saada erosiooni protsessidest ning saadud andmete põhjal on võimalik teha vastavaid samme kaitsmaks pinnaseid erosiooni vastu (Iserloh et al. 2013).

1.2. Vihmasimulaatorite liigitus

Vihmasimulaatorid jagunevad valdavalt kahte rühma: rõhuga düüsidega (*pressurized nozzle*) ning tilka tekitavad (*drop-forming*) simulaatorid. Mõlema rühma simulaatorid võivad erineda vihma intensiivsuse ning tilga suuruste poolest. Eraldi võib veel liigitada

simulaatoreid, mis kasutavad rõhuga düüse, kuid samas tekitatakse ka mingi vaheekraani abil suurem tilk, et saavutada loodusele lähedasem tilgaenergia. Järgnevalt on kirjeldatud maailmas esinevaid rõhuga düüsidega simulaatoreid, ühte erosioonisimulaatorit ning seadet, kus vaheekraani abil muudetakse rõhuga düüside vihma tilga suurust.

1.2.1. Rõhuga düüsidega (*pressurized nozzle*) vihmasimulaatorid

Rõhu all töötavad vihmasimulaatorid kasutavad erinevaid düüse, mis töötavad kindlates rõhuvahemikes. Düüse on olemas mitmesuguseid, neil on erinevad kasteraadiused ning kastenurgad, enamus düüsidel saab neid piiratult reguleerida. Süsteemis peab olema vajalik sulgarmatuur ja vajadusel rõhutõste seadmed, et kontrollida düüsideni jõudvat survet ning vooluhulka.

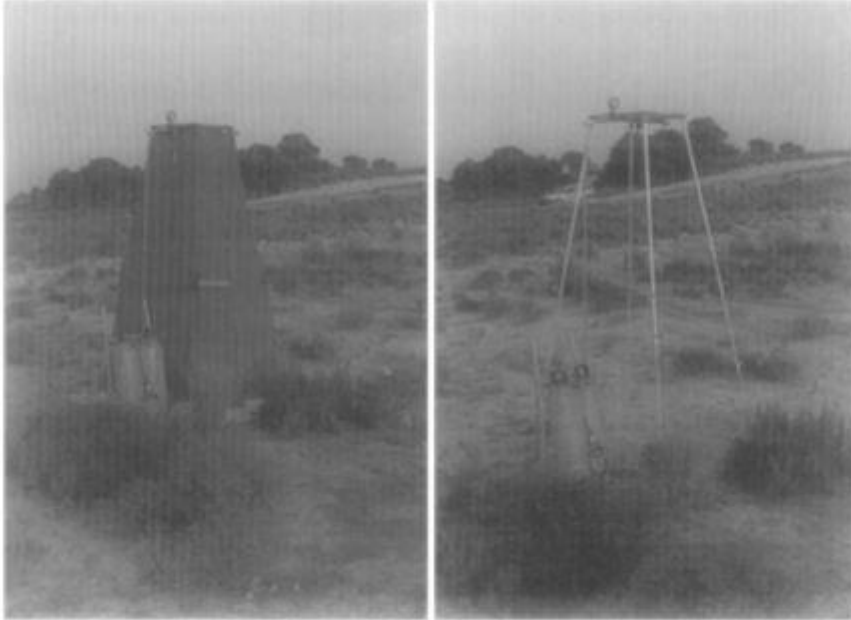
Vihmasimulaatorites kasutatavad düüse on toodetud valdavalt plastist. Düüside valikul tuleb kindlaks teha kasutamise eripärad, sest düüsid tekitavad kunstvihma erinevate raadiustega, jaotuse ja moodustavate tilkade suurustega.

Rõhuga süsteemide eeliseks on kasutamise lihtsus ning opereerimine mitmekesistes keskkondades, nii labori kui välitingimustes. Düüside kunstvihma intensiivsust saab lihtsalt ning sujuvalt muuta erinevate sulgarmatuuri elementidega. Tilgaenergia saavutamiseks pole vaja pikka langemiskõrgust, kuna düüsist väljub survega vesi ja tilk on saavutanud vajaliku kiiruse juba düüsist väljudes. Düüside kunstvihma tekitamise intensiivsus sõltub düüsi ava diameetrist, rõhust, vooluhulgast ning kui on paigaldatud simulaatoris mitmeid düüse, mõjutab intensiivsust ka düüside vahekaugus. Edasi on toodud mõned näited maailmas konstrueeritud rõhuga düüsidega vihmasimulaatoritest.

1.2.2. Valencia vihmasimulaator

Valencia ülikooli ning Polütehnikumi koostööna aastal 1997 valmistatud simulaator (Joonis 1.1) on edasiarendatud versioon 1988 aastal Calvo poolt disainitud rõhuga düüsidega simulaatorist. Simulaator kasutab düüsi HARDI-1553-10 ning disainitud simulaator on mõeldud kasutamiseks karmidel poolariidsetel maastikel ja on hõlpsasti teisaldatav. Simulaator koosneb viiest osast : düüsist, raamist, mille küljes on düüs, ühendusest veeallikaga, pumbast ja viimasena tuule kaitsest. Antud simulaator tekitab

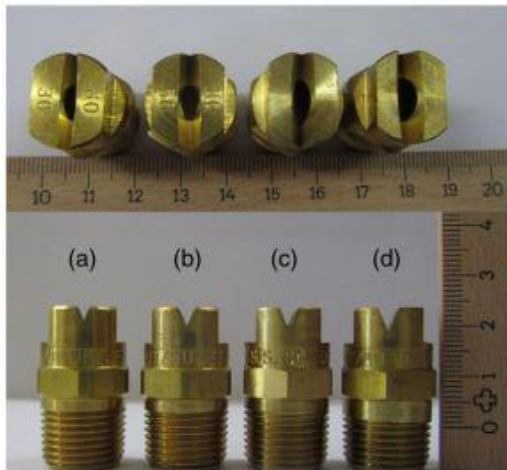
kunstvihma intensiivsusega 55 mm/t (0,92 mm/min). Kõrgusel 2 meetrit oli konkreetse düüsi kasteraadius 1 m², kuid katsealana kasutati sellest 0,24 m². Stabiilne tööõhk antud düüsil oli 1,52 bar (Cerdà et al. 1997).



Joonis 1.1. Valencia vihmatisimulaator (Cerdà et al. 1997).

1.2.3. Vihmasimulaator koos erosioonisimulaatoriga

Aksoy jt (2012) poolt on kirjeldatud vihmatisimulaator, mis koosneb ühtlasi ka erosioonisimulaatorist. Katseala on väga suur, erosioonisimulaator koosneb 1,36 x 6,50 m alast sügavusega 0,17 m ning võimalik on reguleerida nii pikema kui lühema külje nõlvust. Vihma tekitavad survekud düüsid VeeJet (Joonis 1.2), antud töös kasutati 4 erineva vihmaintensiivsusega düüsi.

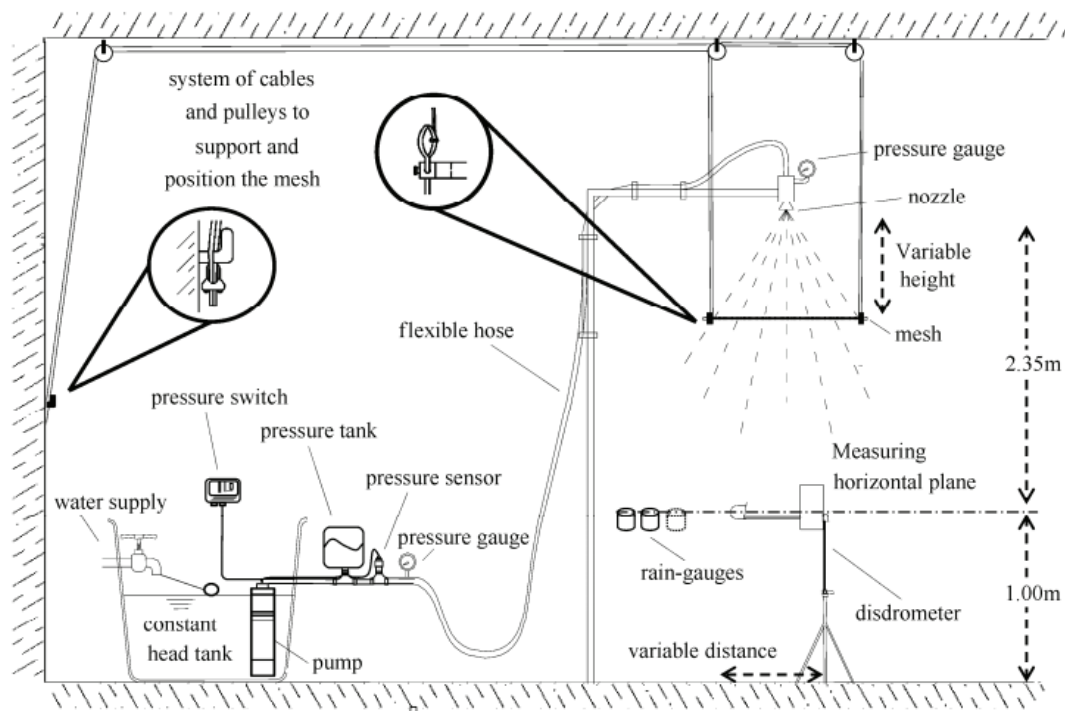


Joonis 1.2. VeeJet düüsid – a) 5030 - 45 mm/t (0,75 mm/min), b) 5050 – 65 mm/t (1,08 mm/min), c) 5060 – 85 mm/t (1,42 mm/min), d) 5080 – 105 mm/t (1,75 mm/min) (Aksoy et al. 2012).

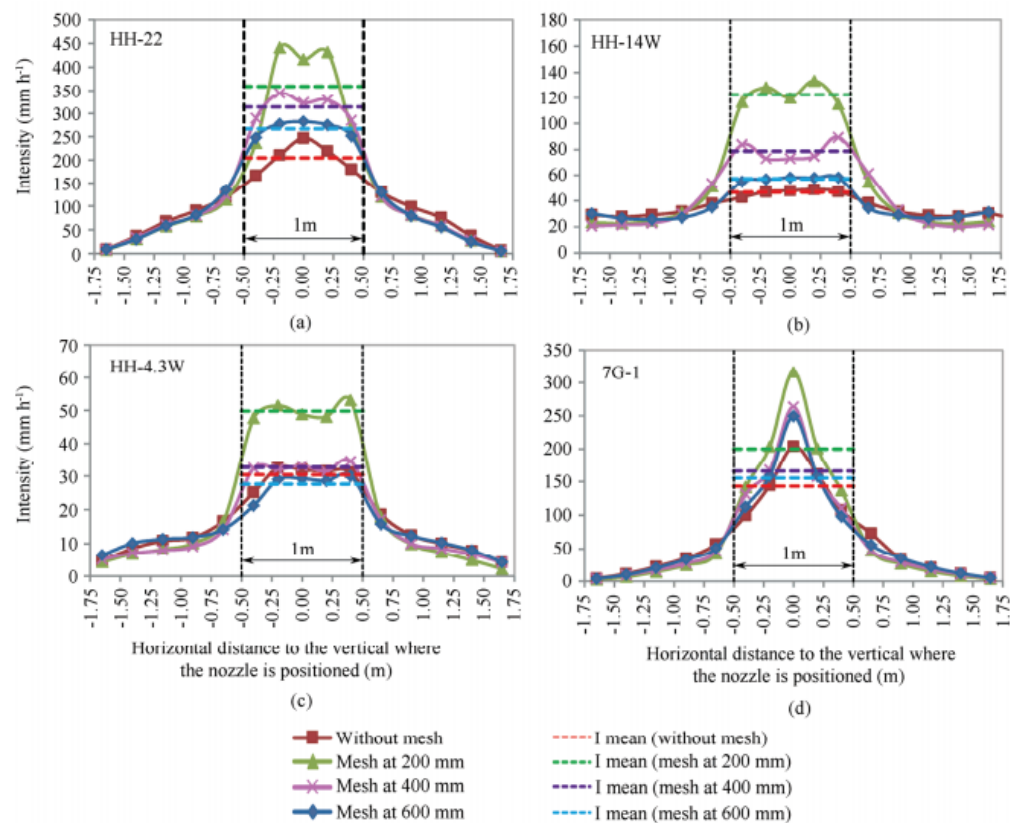
Antud simulaatoriga teostatud katsetel saavutatud ühtlase jaotuse protsent jäi vahemikku 82 kuni 86%, tilga kukkumise vahemaa erosioonisimulaatorile oli 2,43 m. Simulaatoriga oli võimalik uurida setete transpordi protsesse erinevate nõlvuste korral.

1.2.4. Vihmasimulaator, kus rõhuga düüsid kombineeritud vaheekraaniga

Portugalis Coimbra ülikoolis uuriti 2014. aastal seda, kuidas mõjutada rõhuga düüside tilga suurst, tilga kukkumise kiirust ning vihma jaotust kasutades selleks võres tüüpi vaheekraane (Carvalho et al. 2014). Antud uurimuses katsetati erinevaid plastikust ning metallist vahendeid võre moodustamiseks (Joonis 1.3). Algul katsetati düüse ilma vaheekraanita, ning seejärel koos plastikust võrega ning tulemusi võrreldi. Alljärgnevalt joonisel (Joonis 1.4) on näidatud punase joonega ilma võreta ning roheline, lilla, sinise joonega katseid, kus plastik võre kaugus düüsist vastavalt 200, 400 ja 600 mm.



Joonis 1.3. Vihmasimulaatori põhimõtteline skeem (Carvalho et al. 2014).



Joonis 1.4. Vihmaintensiivsused ekraanita ning ekraaniga erinevatel kõrgustel (Carvalho et al. 2014).

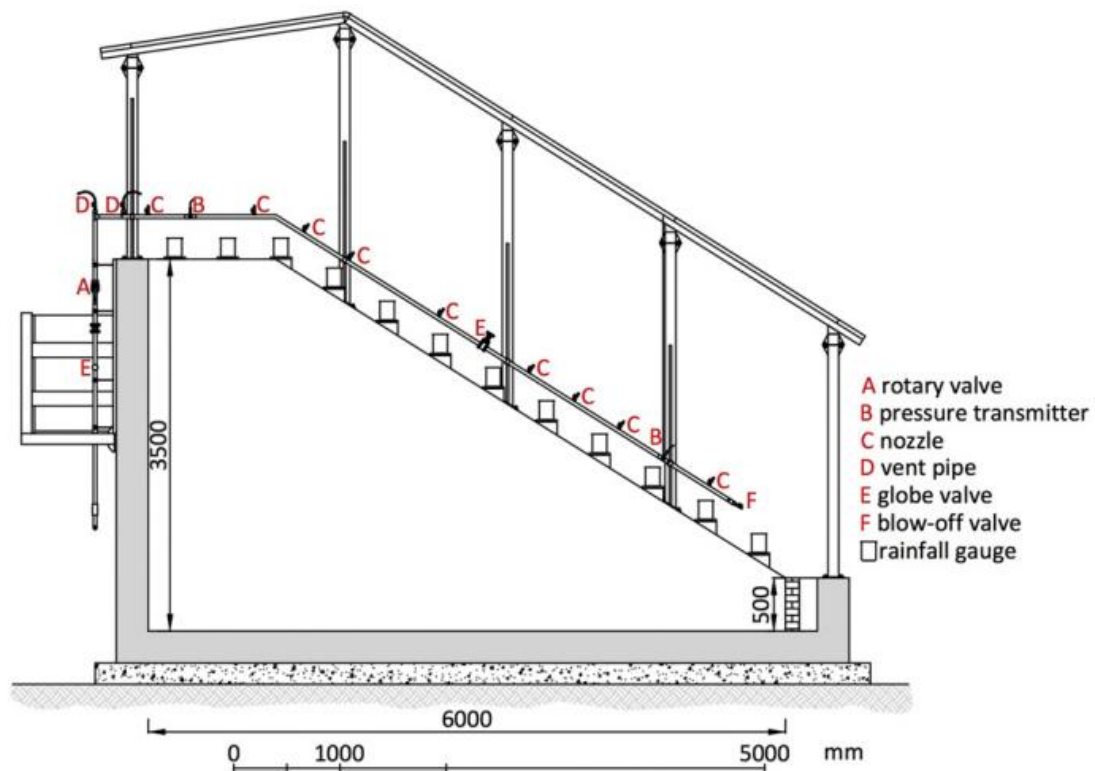
Katsete tulemusel selgus, et vaheekraani lisamine muudab intensiivsust suuremaks, kui ilma ekraanita vihmutamise. Antud olukorras ei tekitanud suuremat vihmaintensiivsust suurendatud vooluhulk, vaid simulaatorile paigaldatud võre vähendas düüsi kasteraadiust, seega oli kogu tekitatud vihm suunatud võrele. Veel oli näha, et mida lähemal oli ekraan düüsile, seda suuremaks muutus vihmaintensiivsus. Nähtus oli tingitud sellest, et tekitatud vihma kasteraadius on väiksem, kui võret liigutati düüsile lähemale. Tulemustes täheldati ka võre omadust tekitada sademete juhuslikku mustrit, ehk tilgad tekkisid võrel erinevatesse kohtadesse ja ei langenud alati samale kohale katsealal. Töös uuriti ka ekraani mõju tilga suurusele ning tilga kukkumise kiirusele. Leiti, et ekraanide kasutamine suurendab tilga suurust keskmiselt kolmandiku võrra ilma ekraanita katsetega võrreldes. Vaheekraanile jäi vesi pidama ning tilk eemaldus võrelt alles siis, kui oli saavutanud piisavalt suure massi. Tilga kukkumise kiirus ei muutunud võrega katsetel, mõlemal juhul olid kukkumise kiirused samas vahemikus (Carvalho et al. 2014).

1.2.5. Padoa Ülikooli rõhuga düüsidega vihmasimulaator

Padoa ülikoolis Itaalias konstrueeriti 2015. aastal Lora, Camporese ja Salandini poolt vihmasimulaator, et uurida maalihete tekke põhjuseid. Antud simulaator oli ehitatud laborisse ning katseala oli mõõtmetelt väga suur (2 x 6 m). Töö eesmärk oli konstrueerida ning katsetada vihmasimulaator, millel on kolm põhilist omadust :

- vihmaintensiivsuse saavutamine vahemikus 50 kuni 150 mm/h (0,83 – 2,5 mm/min);
- ühtlane jaotus vähemalt 80 %;
- piiratud tilga energia pinnasele, et vältida pinnaerosiooni teket, mis võib muuta infiltratsiooni protsesse mis põhjustavad maalihkeid.

Eesmärkide saavutamiseks katsetati kolme erinevat düüsi, et selgeks teha peamisi tegureid, mis mõjutavad düüside funktsioneerimist. Seejärel tehti edasisi katseid, mille tulemuste põhjal reguleeriti vihmasimulaator tööle eesmärkide kohaselt (Lora et al. 2016). Põhimõtteline skeem antud simulaatorist on alljärgneval joonisel (Joonis 1.5).



Joonis 1.5. Padoa ülikooli simulaatori põhimõtteline skeem (Lora et al. 2016).

Simulaator töötas rõhul 1 kuni 1,2 bar ning vajab korrektseks tööks konstantse survega veeallikat. Süsteem ise kujutas endast ringvõrku, kuhu oli võimalik paigutada maksimaalselt 18 düüsi.

2. VIHMASIMULAATORI PROJEKTEERIMINE JA EHITAMINE

Vihmasimulaatorite loomisel on üheks eesmärgiks saavutada võimalikult ühtlane vihmajaotus. Üksikute suure intensiivsusega düüside korral on probleemiks erinevate düüside kattuvad või nende vahele jäävad alad, mis vooluhulka muutes võivad olla erineva suurusega. Veemajanduse osakonna eelmise vihmashimulaatori analüüsimisel tekkis idee, et alternatiiv oleks kasutada uduvihmuteid, mis tekitaksid ühtlase "pilve". Uduvihmuti kasuks otsustati tema väikese vooluhulga ja tekkiva veejaotuse tõttu. Kui ühe düüsi vooluhulk on väike, peab neid olema piisavalt, et saavutada vajalik vihmaintensiivsus ning kui düüse on katsealale vaja suurem arv, on ühtlast jaotust võimalik saavutada kergemini. Käesolevas töös on välja selgitatud :

- vajalik uduvihmutite kogus, et saavutada vihma intensiivsus kuni 2,3 mm/min 1,2 m² alale;
- uduvihmuti kasteraadius kõrgusel 50 cm;
- kunstvihma jaotus ilma ja koos ekraaniga;
- solenoidklapi abil vihma intensiivsuse reguleerimine 0,4 mm/min – 2,3 mm/min.

Kuna uduvihmuti ei tekita tilka, oli vaja konstrueerida vihmashimulaatori ja nõlvaseadme vahele tilka tekitav ekraan.

Projekteeritava vihmashimulaatori dimensioonid lähtusid selle alla kavandatava nõlva mõõtmetest. Seetõttu pidi vihmashimulaator katma selle alla jääva 2m pikkuse ning 60 cm laiuse ala. Vihmasimulaatori dimensioone suurendati, et ei tekiks olukorda kus nõlva ääre piirkondi vihmutada pole võimalik.

Uurides olemasolevat kirjandust, ei leitud uduvihmutite kasutust vihmashimulaatorites. Uduvihmutite mittekasutamine on põhjendatav, sest düüs ei tekita piisavalt suurt tilka, et kunstvihmal oleks vajalik tilga energia ning düüsid töötavad kitsas rõhu vahemikus (3-5 bar). Nendest puudustest ülesaamiseks oli vaja leida lahendus suure tilga tekitamiseks ja intensiivsuse muutmiseks. Tilgad ei tohi moodustada ka kindlat mustrit pinnasele, vaid peavad langema juhuslikult. Vajaliku tilga suuruse ning juhuslikkuse tekitamiseks konstrueeriti vihmashimulaatorile vaheekraan, milleks kasutati plastist harjasmatti.

Kasutatud harjasmatt on tihe ning piisavalt ebakorrapärase struktuuriga, et tagada tilkade moodustamine, samas ei tekita harjasmatt tilkade langemisel mustrit pinnasele.

Kõik joonised on koostatud autori poolt (kui pole märgitud teisiti) programmiga Autodesk Inventor 2017. Joonised koostati enne tarnimist ning täiendati jooksvalt ehitus protsessi käigus.

2.1. Simulaatori vihmaintensiivsuse projekteerimine

Lähteülesande kohaselt oli vaja tekitada 2,0 x 0,6 m katsealale kunstvihm intensiivsusega 2,3 mm/min. Enne edasisi arvutusi otsustati kunstvihma kasteala muuta suuremaks – 2,1 x 0,7 m, et tagada erosioonisimulaatori katsealale kunstvihma ühtlane jaotus, et vältida ääreefekti, kus vihm lõpeb täpselt katsealaservas, mida aga ei ole reaalselt võimalik saavutada, sest osa piiskadest ei lange vertikaalselt alla vaid lenduvad veidi külgsuunas. See tuleneb vihmute tüüpiliselt ringikujulisest kasteala kujust.

Töös otsustati kasutada kunstvihma tekitamiseks uduvihmutit tootjalt Netafim nimega CoolNet Pro. Uduvihmuti sai valitud mitmel põhjusel :

- varasem kogemus vihmasimulaatoritega veemajanduse osakonnas, kus tavapärase düüsidega ei saavutatud piisavalt ühtlast jaotust;
- düüsi väike vooluhulk, mida väiksem vooluhulk ühel düüsil, seda rohkem vihmuteid on vaja kasutada ning ühtlast jaotust on lihtsam saavutada;
- kuna uduvihmutite kasutust vihmasimulaatoris ei leitud olemasolevast teaduskirjandusest, oli huvitav teada saada, kuidas sobib uduvihmuti kunstvihma tekitamiseks.

Tootja Netafim pakub kolme erineva vooluhulgaga CoolNet Pro düüse, mida saab eristada düüsi plastikkorpuse värvi järgi (Tabel 2.1).

Tabel 2.1. CoolNet Pro erinevad düüsid (Netafim 2018).

CoolNet Pro düüs	Vooluhulk, l/t	Nominaal töö rõhk, bar	Töörõhu vahemik, bar	Düüsiava suurus, mm
Light Green	5,5	4	3-5	0,51
Silver Gray	7,5	4	3-5	0,61
Sky Blue	14,0	4	3-5	0,88

Järgnevalt oli vaja arvutada, mitu düüsi on vaja kastetava ala vihmutamiseks, et saavutada intensiivsus 2,2 mm/min. Arvutused tehti kõigi kolme düüsi kohta ning seejärel valiti konkreetne düüs vastavalt eesmärgile ja saadavusele (Tabel 2.2). Arvutuseks oli vaja teada järgnevaid algandmeid

- kasteala – $2,1 \cdot 0,7 = 1,47 \text{ m}^2 = 147 \text{ dm}^2$;
- vihmaintensiivsus - 0,022 dm/min.

Vajalik düüside arv arvutati valemiga 2.1:

$$N_d = \frac{Q_{vaj}}{Q}, (2.1)$$

kus N_d on vajalik düüside arv tk;

Q – düüsi vooluhulk l/min;

Q_{vaj} – vajalik vooluhulk vihmaintensiivsuse 0,023 dm/min saavutamiseks 147 dm^2 kastealal.

Tabel 2.2. Vajaminevate düüside arvu leidmine.

CoolNet Pro düüs	Vooluhulk Q, l/t	Vooluhulk, l/min	Kasteala, dm^2	Vihmaintensiivsus, dm/min	Vajalik vooluhulk Q_{vaj} , l/min	Vajalik düüside arv N_d , tk
Light Green	5,5	0,092	147	0,023	3,234	35
Silver Gray	7,5	0,125	147	0,023	3,234	26
Sky Blue	14	0,233	147	0,023	3,234	14

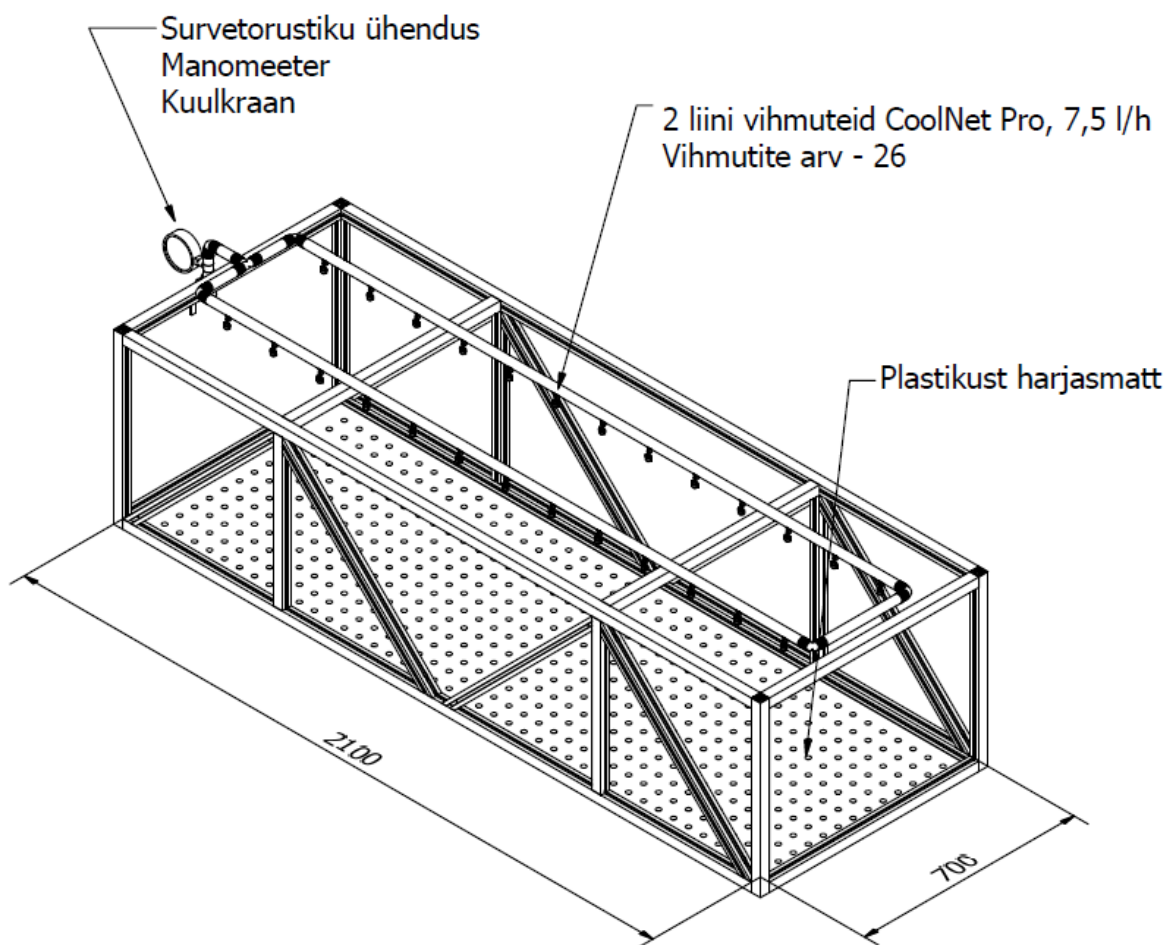
Uurides kättesaadavaid düüse Eestis vihmutusega tegeleva firma Water Boys OÜ projekterija Taavi Lulla käest sai selgeks, et Eestisse Light Green uduvihmuteid ei ole võimalik tarnida, seega otsustati kasutada Silver Gray düüse.

Vastavalt vajalike düüside arvule koostati esialgne eskiis ehitatava vihmashimulaatori kohta (Joonis 2.1).

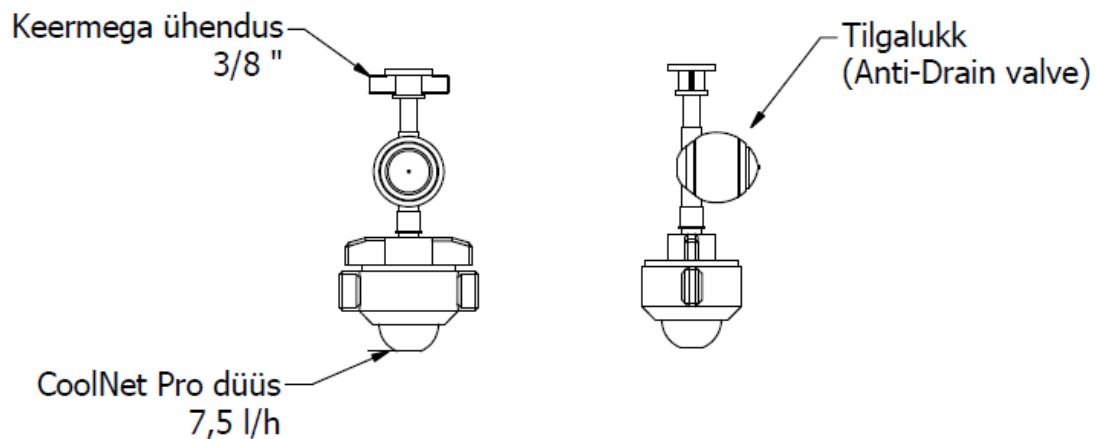
Antud töös kasutatud uduvihmuti koosnes kolmest komponendist (Joonis 2.2) :

- keermega ühendus 3/8" – ühendus vihmuti ning lateraaltorustiku vahel, eelnevalt vaja torustikku keermestada 3/8" auk;
- tilgalukk (Anti-Drain valve) – peatab uduvihmuti töö peale kuulkraani sulgemist, takistab vihmutist vee tilkumise;
- CoolNet Pro düüs (Silver Gray) – plastist valmistatud düüs ning düüsi korpus.

Vihmutidüüs ühendatakse tilgalukuga mehaaniliselt sisse surumisega, samuti keermega ühendus tilgaklapiga. Nii on komponente lihtne paigaldada ja vahetada.



Joonis 2.1. Vihmasimulaatori eskiisjoonis, mõõdud mm.



Joonis 2.2. CoolNet Pro komponentide skeem.

2.2. Kasteraadiuse määramine

Enne liinide kokkupanekut otsustati katsetada Silver Gray düüsi vooluhulka ja kasteraadiust ühe düüsiga. Probleem seisnes uduvihmuti eripäras, kasteraadiust ei ole võimalik fikseerida, sest see oleneb kastetava ala distantstist vihmuti düüsi suhtes. Vajalik oli välja selgitada düüsi kasteraadius kõrgusel ca 50 cm.

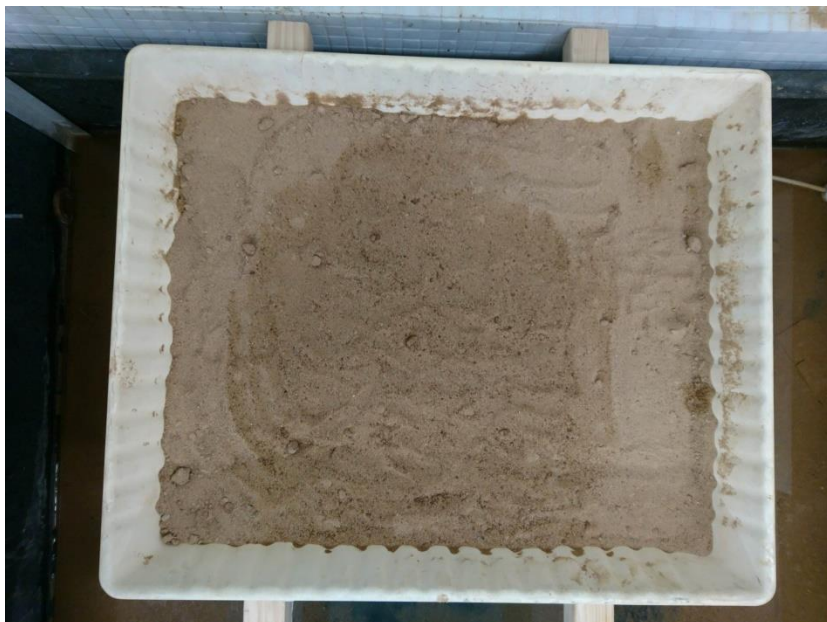
Vooluhulga ja kasteraadiuse katsete jaoks valmistati ajutine seadeldis, kasutades 2014. aastal Ilja Oja poolt koostatud magistritöö raames ehitatud vihma-simulaatorit samas laboris, CoolNet Pro düüside veevarustuseks (Oja 2014).

Esmalt otsustati kontrollida ühe Silver Gray düüsi reaalselt vooluhulka. Tootja Netafim pakub kasutatud düüsi vooluhulgaks 7,5 l/t töö rõhul 4 bar. Vooluhulga väljaselgitamiseks teostati ühe düüsiga 10 katset (Tabel 2.3). Vooluhulga mõõtmiseks kasutati plastist topsi, mille kaal tehti eelnevalt kindlaks ja tulemuse leidmiseks kaaluti tops koos veega. Iga katse kestus oli 10 sekundit ning tulemuste põhjal arvutati keskmine vooluhulk. Katse tulemusena selgus, et vooluhulk on 0,33 l/t suurem Netafim poolt pakutud väärtusest. Leitud väärtust võib lugeda siiski lähedaseks Netafim poolt antud väärtusega 7,5 l/t. Vooluhulk sõltub rõhust ning antud seadmega ei olnud võimalik tagada rõhku piisava täpsusega.

Tabel 2.3. CoolNet Pro Silver Gray düüsi vooluhulga katsed.

Katse nr	Maht (ml)	Aeg (s)	l/t
1	20,81	10	7,49
2	22,38	10	8,06
3	21,96	10	7,91
4	21,98	10	7,91
5	21,22	10	7,64
6	21,60	10	7,78
7	22,20	10	7,99
8	21,94	10	7,90
9	21,96	10	7,91
10	21,32	10	7,68
Keskmine vooluhulk			7,83

Kasteraadius määrati kasutades ühte CoolNet Pro düüsi, mis töötas minut aega ning raadius mõõdeti liiva pealt. Düüs oli liivpinnast 52 cm kõrgusel. Pärast minutilist kastmist määrati vettinud pinnase kasteraadius. Katse tulemusel selgus, et kasteraadius 52 cm kõrgusel oli ca 35 cm (Joonis 2.3). Kasteraadiuse katsega selgus, et kasutades kahte liini 13 vihmutiga, on võimalik kasteala piisavalt ära katta, et tekiks võimalikult ühtlane jaotus.



Joonis 2.3. Kasteraadiuse määramine kasutades liiva.

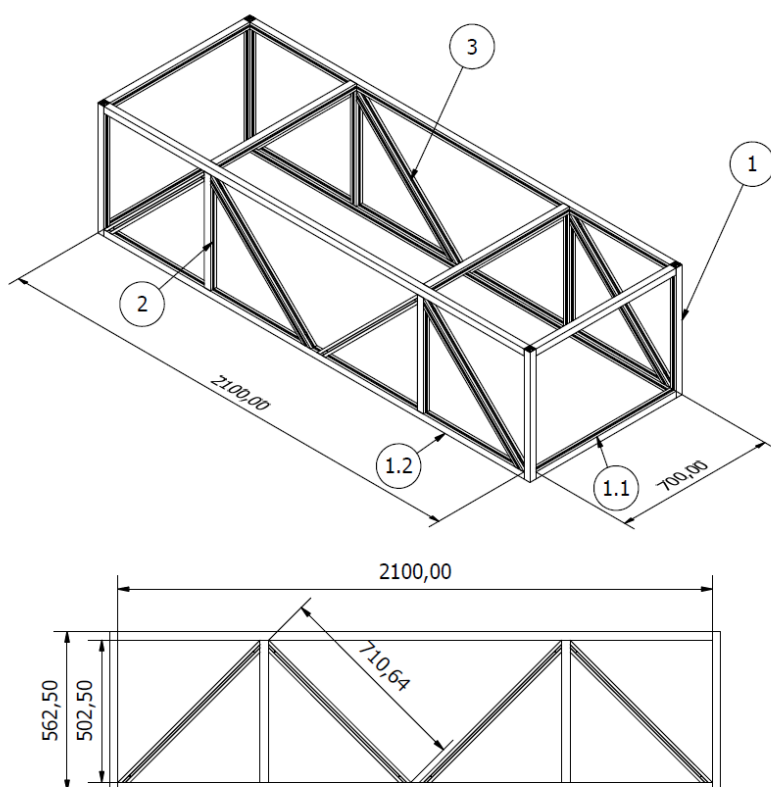
2.3. Simulaatori kandekonstruktsioon

Vihmasimulaatori mõõtmed pidid vastama lähteülesandele: vihmutatav ala 2,0 m x 0,6 m.

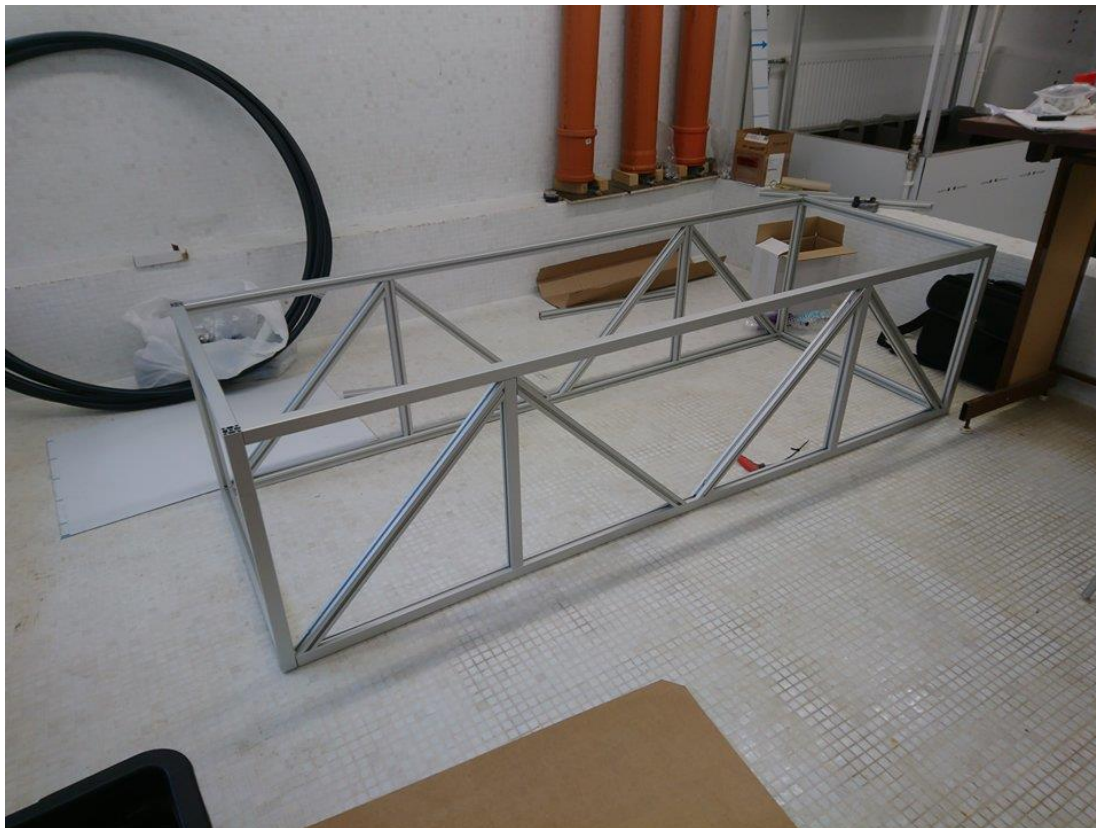
Et tagada vihmutus tervele alale, otsustati konstruktiivselt valida järgmised mõõtmed :

- pikkus = 2,1 m;
- laius = 0,7 m;
- kõrgus = 0,56 m.

Kandekonstruktsioon kujutas endast alumiiniumprofiilist raami. Alumiinium sai valitud tema kerge kaalu ning heade tugevusomaduste tõttu. Antud tööks valiti lahendus tootjalt MiniTec. MiniTec on maailmas tuntud erinevate alumiiniumprofiil lahenduste poolest. Antud vihmasimulaatori raami konstrueerimiseks valiti MiniTec profiil, sest seda on kerge omavahel ühendada ja vajaliku tugevusega raami saab konstrueerida kasutades käsitööriistu ning MiniTec poolt loodud spetsiaalseid ühendusvahendeid. Autori poolt projekteeriti simulaatori raami joonis (Joonis 2.4) ning koostati vajaminevate materjalide loetelu (vt Lisa 1). Joonis 2.5 on toodud raam kokkupanduna.



Joonis 2.4. Vihmasimulaatori alumiiniumraam eskiis.



Joonis 2.5. Vihmasimulaatori kandev alumiiniumraam.

Uduvihmutid oma iseloomu poolest tekitavad peente piiskadega vihma, mis on pilve laadne. Seega oli otstarbekas eraldada vihmuteid ülejäänud laboriruumi keskkonnast akrüülklaasi abil, millel on 3 põhilist ülesannet :

- uduvihma veekao ära hoidmine;
- katsete sooritajate kaitsmine külgsuunas lenduva vihma eest;
- kontsentreerida kogu tekitatud kunstvihm määratud katsealale.

Kandevkonstruktsioon oli projekteeritud nii, et seda oleks võimalik paigaldada laekonstruktsiooni või kõrgemale, seega ei olnud ette nähtud eraldi kandvaid tugesid mis ulatuksid põrandale. Peamine põhjus selliseks kinnitusviisiks oli võimalikult suure vahemaa tekitamine kunstvihma tekkekoha ning katseala vahel, et tekiks suurem tilgaenergia. Osaliselt valiti ka sel põhjusel raami materjaliks alumiinium, et laekonstruktsiooni külge kinnitatav konstruktsioon ei muutuks liiga raskeks. Konstruktsioon ühendati betoonlaega neljast punktist kasutades nurkasid ning keermelatte.

Keermelattidele puuriti lakke augud ning kinnitati kasutades ankruliimi. Keermelatt ühendati nurkadega kasutades mutreid. Mutrite abil looditi neljast nurgast kogu konstruktsioon horisontaalsesse asendisse (Joonis 2.6).



Joonis 2.6. Konstruktsiooni kinnitus.

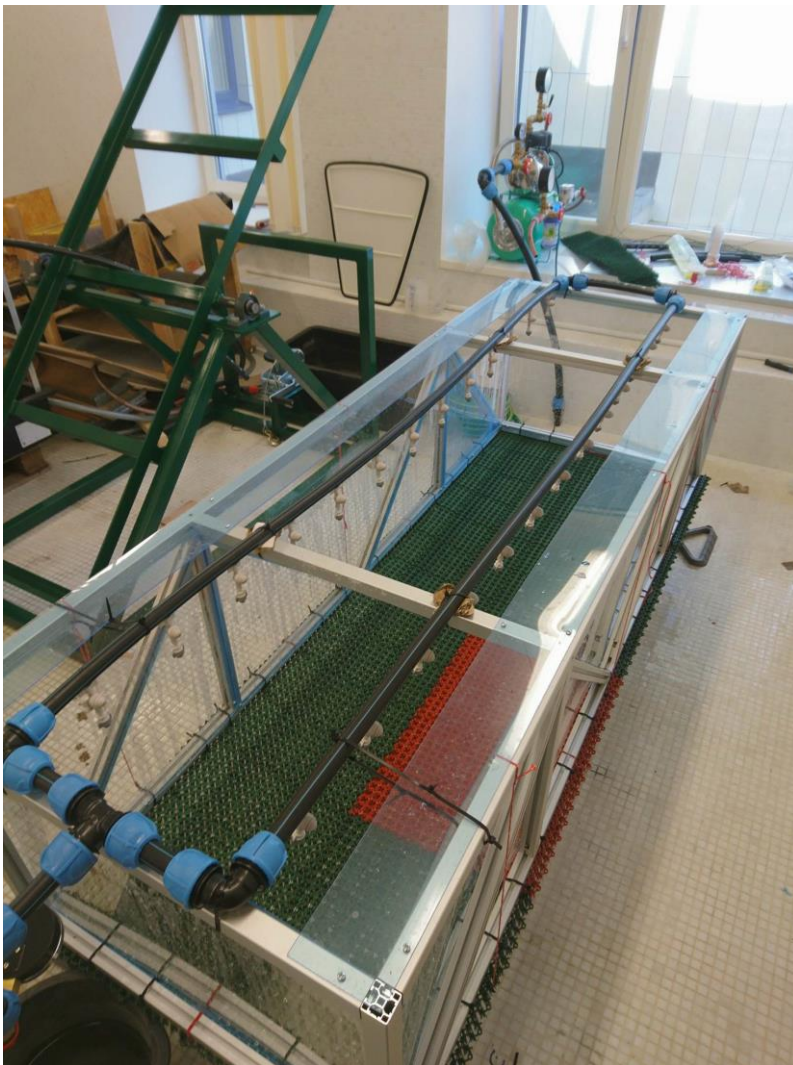
2.4. Vihmasimulaatori varustamine veega, toruarmatuur

Veeallikas, mis toidab vihmasimulaatori survetorustikku, võeti olemasolevast külmaveetorust mis asub labori D169 seinal. Ühendus olemasoleva torustikuga teostati kasutades Gardena universaalset aiavoolikusüsteemide liitmiku ning 19 mm läbimõõduga aiavoolikut.

Vihmasimulaatori survetorustik koosneb tootja Pipelife polüetüleentorudest ning surveliitmikest. Materjal valiti peaaesjalikult süsteemi kokkupaneku lihtsuse ning polüetüleen materjali paindlikkuse poolest. Kasutades mehaanilisi surveliitmike, ei ole tarvis spetsiaalseid tööriistu torustiku monteerimiseks. Simulaatori vooluhulka saab reguleerida kuulkraani abil ning töö rõhku näeb paigaldatud manomeetriga. Materjalid, millest kogu toruarmatuur koostati, on välja toodud tabelkujul (vt Lisa 2).

Enne PE toru surveliitmikuga ühendamist pidi toru otsad faasima ning ära puhastama. Selleks kasutati spetsiaalset torufaasijat, mis sobib toru välisläbimõõdule 20-63 mm. Liitmike kinnitamiseks ei olnud vaja spetsiaalseid tööriistu, kõik ühendused pingutati käsitsi.

Torustik kinnitati alumiiniumraamile kasutades kaablivitsasid. Seejärel kinnitati raami sisekülge akrüülklaasist seinad, et kogu tekitatud kunstvihm langeks soovitud katsealale. Viimasena kinnitati plastist harjasmatt. Harjasmatt kinnitati raami külge kasutades kaablivitsasid ning müürinöör tõmmati kohtadesse, kus vaatlusel tundus olevat suurem lohukoht. Kui vihmasimulaator oli põrandal valmis ehitatud, paigaldati see lakke kasutades keermelatte. Enne lae alla paigaldust katsetati komplektset simulaatorit põranda kõrgusel. Valmis ehitatud vihmasimulaator on toodud Joonis 2.7.



Joonis 2.7. Vihmasimulaator.

2.4.1. Sõlm solenoidklapi ning veearvestiga

Antud vihmäsümulaator oli projekteeritud 2,31 mm/min kunstvihma tekitamiseks. Kuna CoolNet Pro uduvihmutite kasutamine on limiteeritud rõhuvahemikku 3-5 bar, ei saa pelgalt rõhu alandamisega saavutada madalamaid vihmaintensiivsusi (alla 1,8 mm/min). Vihmaintensiivsustele alates 0,4 mm/min saavutamiseks kasutati lahendusena solenoidklappi, mille lahti ning kinni oleku aega saab reguleerida kontrolleri abil. Tekkiv tsükliline kastmine on teatud määral sarnane ka reaalsele vihmale, kus ka intensiivsus võib lühiajaliselt muutuda. Kasutatud solenoidklapi ning kontrolleri projekteeris, valmistas ning programmeeris Morten Poolakese.

Klapi abil tekitab olukord, kus madalamate vihmaintensiivsuste saavutamiseks sajab vihma kindel aeg, seejärel vihm lakkab määratud ajaks, ehk tekitatud vihm on iseloomult mõõdukalt tsükliline (harjasmatt annab teatud „inerti“). Kontrolleri abil oli võimalik solenoidklapi lahti ning kinnioleku aega reguleerida vahemikus 0-20 sekundit. Vooluhulga ning vooluhulga kaudu vihmaintensiivsuse määramiseks paigaldati sõlme ka veearvesti, millega on võimalik mõõta veemahtu 0,1 liitri täpsusega. Veearvesti oli eriti vajalik vihmaintensiivsuse arvutamiseks solenoidklapi töötamise ajal, kuna sel juhul on intensiivsuse arvutamiseks vajalik teada tegelikku veemahtu (Joonis 2.8).



Joonis 2.8. Sõlm solenoidklapiga (vasakul), kontrollriga (üleval) ning veearvestiga (paremal).

2.5. Kunstvihma ühtlase jaotuse koefitsient

Vihmasimulaatori korrektseks tööks on vaja saavutada piisavalt ühtlane kunstvihma jaotus. Uurides olemasolevat teaduskirjandust vihmashimulaatorite ehituse ning katsetamiste kohta, sai selgeks, et valdavalt kasutatakse ühtlase jaotuse arvutamiseks Christianseni poolt välja töötatud ühtlase jaotuse koefitsienti CU (*coefficient of uniformity*, %) (Christiansen 1941). Kunstvihma ühtlase jaotuse leidmiseks Christianseni valemi järgi pidi katse läbi viima kasutades konteinereid ühtlase asetusega mustriks, mis paigutati kunstvihmaga kastetavale alale. Peale katse läbiviimist määrati kontainerites olev veemaht. Ühtlus arvutati kõikides kontainerites sisalduva veemahu keskmise ning iga kontaineri mahu summa absoluutväärtus keskmise väärtuse hälbest (Christiansen 1941).

$$CU = 100 * \left(1 - \frac{\sum |z-m|}{n*m}\right), (2.2)$$

kus CU (%) on ühtlase jaotuse koefitsient;

m – kontainerite veemahtude aritmeetiline keskmine;

z – kontaineris oleva veemahu hälve keskmise väärtuse (m) suhtes;

n – kontainerite arv.

Teaduskirjandusest uuriti vajalikku CU väärtuse vahemikku, mida vihmashimulaatorid on saavutanud. Aksoy jt. (2012) poolt ehitatud vihmashimulaatori puhul kasutati nelja erineva intensiivsusega düüsi. Iga düüsi korral arvutati ka ühtlase jaotuse väärtused. Selles töös jäid CU väärtused 82 ja 89 % vahel. Lora jt. (2015) ehitatud vihmashimulaatori väärtused jäid 68,5 ja 80,0 % vahele.

Perez-Latorre jt. (2010) simulaatori puhul reguleeriti düüside tööd solenoidklapi abil ning saavutati CU väärtused vahemikus 64,5 – 92,6 %. Antud töös kasutati erinevate intensiivsuste saavutamiseks sarnast lahendust solenoidklapi näol, sarnaselt reguleeriti kui kaua kestavad vihmutamise intervallid.

Ülaltoodud kirjanduse põhjal võib väita, et soovitatav ühtlase jaotuse koefitsiendi väärtus peab jääma üle 80 protsendi, et tekitatud kunstvihma efektiivsus oleks rahuldav.

3. VIHMASIMULAATORI KATSETAMINE

Valmishitatud vihmashimulaatoril oli vajalik välja selgitada kaks põhilist aspekti enne kasutamist erosioonisimulaatoril :

- leida, kui ühtlaselt simulaator vihma tekitab ehk leida ühtlase jaotuse koefitsient CU;
- leida optimaalsed kinni/lahti režiimid solenoidklapile, et intensiivsust oleks võimalik reguleerida 0,4 – 2,3 mm/min.

Enne mõõtmiskatseid selgitati välja sobivad režiimid solenoidklapi töötamiseks visuaalse vaatluse teel. Vajalik oli leida selline lahtioleku režiim, kus väiksema intensiivsuse saavutamiseks ei teki väga suur klapi kinnioleku aeg, seega ei saa klappi väga kaua avatuna hoida. Kõik katsed tehti läbi kolmel erineval lahtioleku režiimil: 2,840, 2,060 ning 1,220 sekundit. Iga lahtioleku režiimiga teostati 5 katset, kus suurendati järkjärgult kinnioleku aega ning mõõdeti vihmaintensiivsust.

Ühtlase jaotuse leidmiseks arvutati Christianseni koefitsient (CU), mille arvutamismetoodika on välja toodud valemiga 2.2. Koefitsiendi leidmiseks viidi läbi katse, kasutades 20 konteinerit, mis olid ühtlase mustrina jaotatud katsealale. Iga katse kestis 6 minutit ning erinevate intensiivsuste juures leiti konteinerite kaalu järgi CU väärtus. Samal ajal leiti katsete käigus ka vihmaintensiivsus, mis arvutati veearvesti näidu põhjal leitud veemahu järgi, millega kasteti katseala 6 minuti jooksul. Katseraporti näidis on väljatoodud lisades (vt Lisa 3).

Vihmaintensiivsuse arvutamiseks kasutati veearvestit ja kella. Igal katsel fikseeriti veearvesti näit esimesel ning kuuendal minutil, seejärel leiti kasutatud veemaht 5 minuti jooksul (W_{5min}) lahutades lõppnäidu algnäidust. Kuna veearvesti mõõtühikuks on kuupmeetrid, teisendati leitud veemaht liitritesse. Kasutades valemit 2.3, leiti keskmestatud vooluhulk Q igale katsele :

$$Q = \frac{W_{5min}}{t \cdot 60}, (2.3)$$

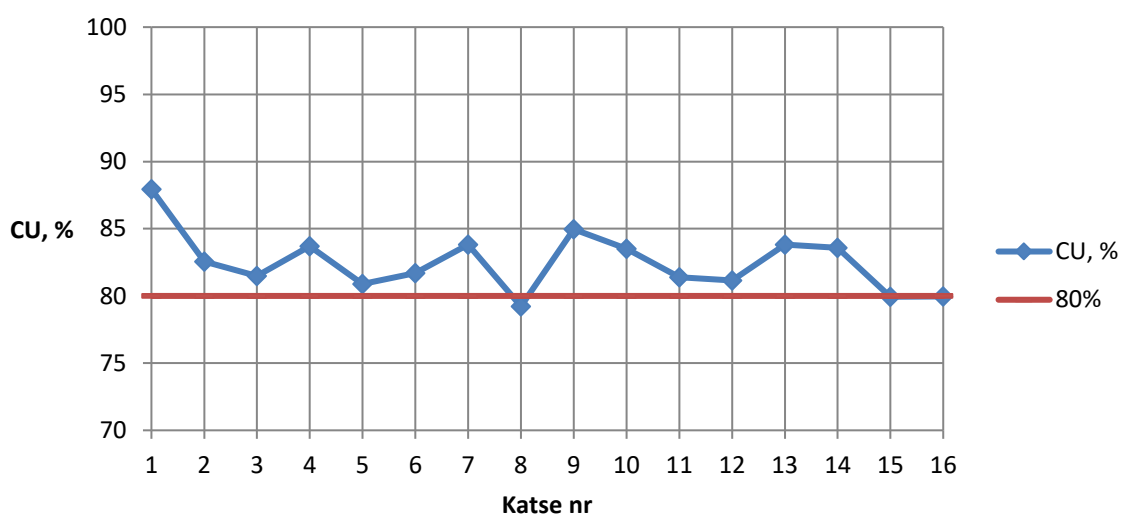
kus Q on keskmestatud vooluhulk (l/s);

W_{5min} – kasutatud veemaht 5 minuti jooksul l;

t – katse kestus min (väärtus 5).

Keskmetatud vooluhulga kaudu leiti tegelik vooluhulk Q_{teg} . Kuna vihmاسimulatori katseala on mõõtudelt (2,1 x 0,7 m) suurem, kui erosioonisimulaatori katseala (2,0x0,6 m), siis pidi leitud vooluhulga läbi korrutama pindala teguriga, mis on vihmاسimulatori ning erosioonisimulaatori katseala jagatis. Leitud vooluhulga järgi sai arvutada tekitatud vihmaintensiivsuse, jagades erosioonisimulaatori katseala pindala Q_{teg} . Kõikidest katsetulemustest koostatud koondtabel on esitatud lisades (vt Lisa 5).

Kui eelnevalt uuritud olemasolevast teaduskirjandusest selgus, et vajalik ühtlase jaotuse koefitsient peaks olema üle 80%, siis katsetulemustest on näha, et käesolevas töös ehitatud vihmاسimulatoriga on võimalik saavutada rahuldav ühtlane jaotus (Joonis 3.1).

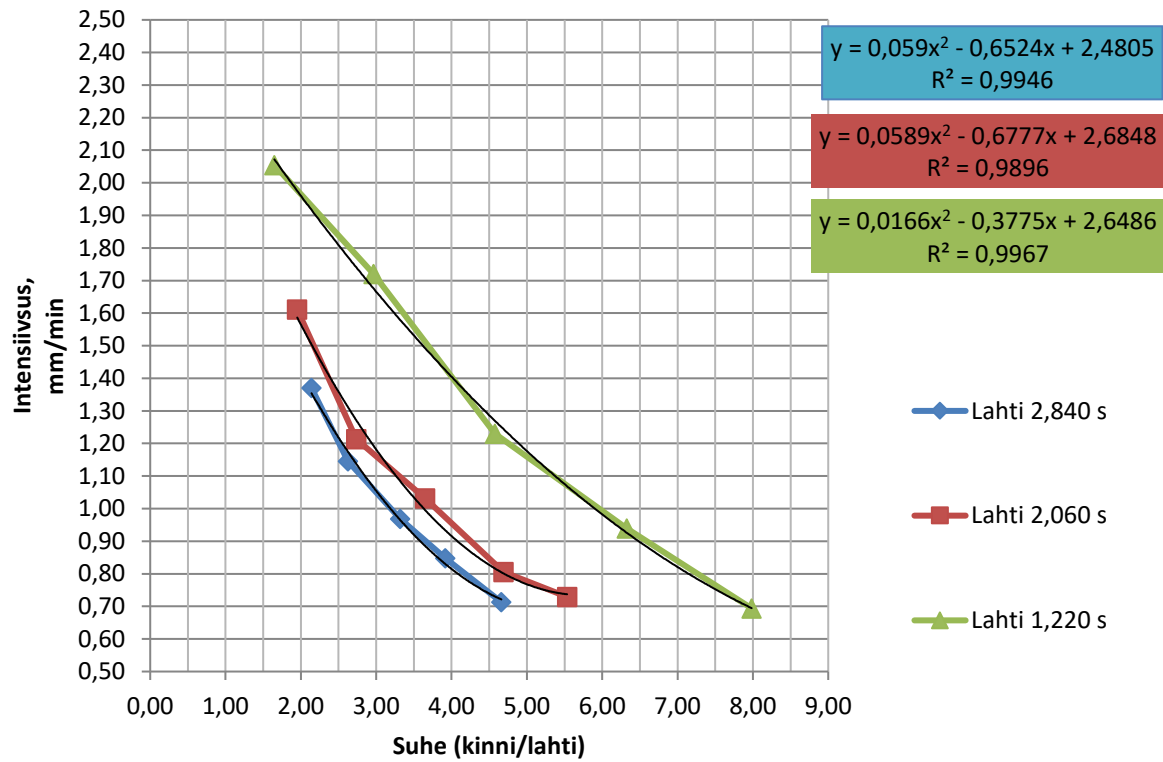


Joonis 3.1. Ühtlase jaotuse katsetulemused.

Katsetamist alustati ilma solenoidklapita ühtlase rõhuga 4 ja 3 bar juures, et välja selgitada suurimad vihmaintensiivsused, mida vihmاسimulatoriga on võimalik tekitada. Mõlema rõhu juures saadi intensiivsuseks ca 2,3 mm/min. Täheldati, et 3 baaril oli rõhu kõikumine väiksem ning simulatori töö ühtlasem, seega otsustati edasised solenoidklapiga katsed teostada rõhul 3 bar.

Katsetulemustest selgus, et solenoidklapiga on võimalik efektiivselt ning kiirelt kunstvihma intensiivsust muuta või alandada nagu oli ka püstitatud eesmärk. Kolme lahtioleku režiimi katsetades otsustati tulemuste põhjal ja visuaalse vaatluse järgi, et kõige parem on kasutada režiimi, kus solenoidklapp on lahti 2,06 sekundit. Sellel režiimil ei

muutu kinnioleku aeg liiga pikaks, st ei teki liiga palju hetki kus vihma üldse ei tekitata. Kasutades andmeid saadud tulemustest oli võimalik koostada kõver iga lahtioleku režiimi kohta. Saadud kõverate võrranditega on võimalik arvutada tekitatava vihma intensiivsus kinni ja lahtioleku aja suhte järgi (kinni oleku aeg/lahti oleku aeg) (Joonis 3.2).



Joonis 3.2. Lahtioleku režiimid 2,840; 2,060 ja 1,220 s.

4. SADEMETE PÕHJUSTATUD PINNAEROSIOON

Sademetes mõju erosioonile on uuritud teaduskirjanduses põhjalikult. Pinnase eraldumine on defineeritud kui pinnase osakeste kõrvaldamine mulla massist kindlas asukohas, mis on põhjustatud sademete ning pinnavee erodeerivate jõudude poolt. Kaasned võivad pinnanirede ning -kanalite teke (Govers G. et al. 1990).

Lal (1988) leidis, et sademete kineetiline energia on tähtis tegur pinnase kõrvaldamise protsessis ning sademete summaarne energia on proportsionaalne sademete erodeeriva jõuga. Sademete kineetiline energia on aga ebapiisav kirjeldamiseks erosiooni tekkimist, sademete erodeeruvad jõud ning erodeeruvus on kirjeldavad terminid ning puuduvad arvulised andmed mis tugineksid reaalsetele erosiooniprotsessidele (Grismer 2012).

Vihmapiiskadel on pinnasele tihendav mõju, samas võivad piisad kokkupuutel pinnasega sellest eemaldada pinnaosakesi: koosmõjul võib pindmine osa sulguda ning infiltratsioon pinnasesse võib hoopis märgatavalt langeda. Kui pinnas on ka nõlvusega, on pinnaseosakeste eemaldumine piiskade mõjul peamine tegur erosiooni põhjustamisel. Kui vihmaintensiivsus ületab pinnase infiltratsioonivõime, koguneb vesi pinnale ning kui pindmisel kihil olevad lohud on täidetud, algab pindmine äravool. Suurem pinnase konarlikkus, mulla harimine ning taimestiku olemasolu vähendavad pindmist äravoolu. Taimestiku olemasolu takistab ka piiskade otsest kokkupuudet pinnasega, mis vähendavad pinnase tihendamist ning infiltratsioonivõime alandamist. Seega on paljas mullakiht kõige haavatavam pindmise äravoolu tekkele (Grismer 2012).

Kõige rohkem mõjutab pindmist äravoolu nõlvuse suurenemine, nõlvuse suurenedes kasvab ka pindmine äravool. Nõlvuse korral ei liigu vesi gravitatsiooni tõttu enam mitte ainult vertikaalselt õhust pinnasesse, vaid hakkab liikuma ka külgsuunas kõrgemalt madalamale. Nõlvusel on täheldatud ka oluline seos vihmapiiskade erosiooniohule, sest mida suurem on nõlvus, seda rohkem pinnast võtab pinnavesi endaga kaasa. Suur pinnanõlvus on domineeriv erosiooni protsesse suurendav tegur.

4.1. Reoveesette kasutamine nõlvakattematerjalina

Nõlvakattematerjalidena on enamasti kasutusel huumuskihi muld, mis on jäänud üle kaevandustöödel ehitusobjektidel või kaevatud otse pinnasest. Selline materjal on levinud ning enamasti kättesaadav. Eestis on tekkinud aga ka huvi uurida, kas reoveesetekomposti kasutamine nõlvakattematerjalina oleks õigustatud. Huvi on praktiline, sest igal aastal tekib reoveepuhastites puhastusprotsessi jäägina reoveesettemuda, millele oleks vaja leida otstarbekat kasutust.

Granadas, Hispaanias, viidi 2011. aastal läbi uurimus, kus kasutati erosiooni leevendamiseks hüdrokülvi, mis oli segatud reoveesettemudaga, et vähendada pindmise erosiooni mõju maanteenõlvadele. Uurimuse tulemusena leiti, et võrreldes kontrollalaga, kus ei kasutatud reoveesetet, oli esimese vegetatsiooniperioodi järel katsealadel erosiooni teke 2,2 – 3,5 korda väiksem. Teise vegetatsiooniperioodi järgselt oli reoveesettega hüdrokülviga katsealade erosiooni tekkimine 4,7 kuni 5,1 korda väiksem, võrreldes esimese vegetatsiooni tsükli järgsete tulemustega (De Oña et al. 2011).

Louisiana osariigi ülikooli Põllumajanduskeskuses uuriti 2012. aastal komposti kasutamist tee nõlvadel, eesmärgiga vähendada hõljuvainete koguhulka kraavides vooluvees ning sellega kaasnevat hägusust. Sademete koguhulk on Louisiana osariigis suhteliselt kõrge ning vihmad ja teelt äravoolav vesi haaravad nõlvadelt kaasa materjali, tekib pinnaerosioon. Katsete tulemustena selgus, et aladel kus kasutati nõlvadel kompostmaterjali, oli veeproovides hõljuvainete koguhulk 70-74 % väiksem kui kontrollaladel, kus komposti ei kasutatud (Bakr et al. 2012). Hõljuvainete vähenemine oli tingitud taimkatte kiirema kasvamise tulemusena kompostmaterjalil. Kontrollaladel, so looduslikul pinnasel, kasvab taimkate väiksema kiirusega ning nõlva pinnas on sademetele avatud pikema aja jooksul.

5. EROSIONISIMULAATORI PROJEKTEERMINE JA EHITAMINE

Käesolevas töös konstrueeritud katseseadme põhieesmärk oli määrata millistel nõlvustel ja vihmaintensiivsustel tekib pindmine äravool ja sellest tingitud pinnase erosioon. Konstrueeritav teenõlvakatte erosioonisimulaator pidi vastama järgmisele spetsifikatsioonile:

- nõlva katseala suurus 2,0 x 0,6 m;
- reguleeritav nõlva kalle kuni 1:1 nõlvuseni;
- võimalik saada andmeid pinnase infiltratsiooni kohta;
- võimalik määrata, millise vihmaintensiivsuse korral algab pindmine äravool ja teha kindlaks erosiooni tekkimise olukorrad erineva nõlvuse korral.

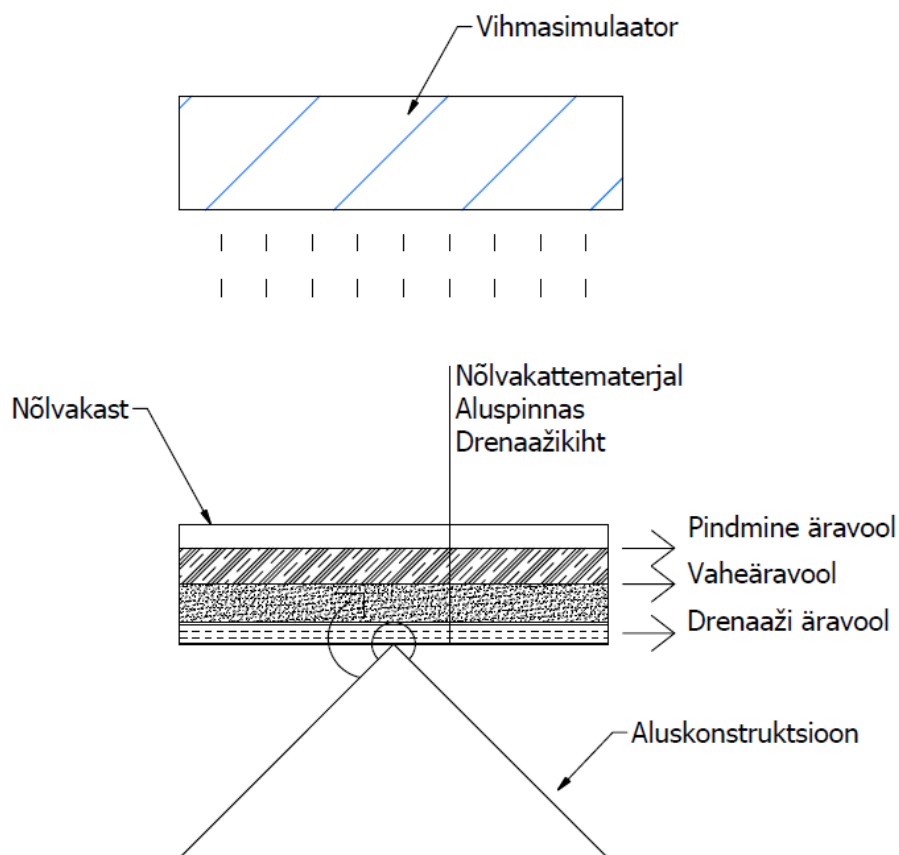
Erosioonisimulaatori kandevkonstruktsioon oli projekteeritud metallist, mis suudaks pinnase ning vee koormusi vastu võtta. Nõlvuse muutmine toimub kiige põhimõttel, kast toetub keskelt laagritel olevale teljele, mis pöörduv koos kastiga. Kuna mõlemale poole telge jääb umbes võrdne mass, ei ole vaja suure katsekeha liigutamiseks tõstemehhanismi. Nõlvuse muutmine on teostatud vintsiga. Kastikonstruktsiooni eesosasse paigutati lisaraskused ning konstruktsiooni tagaosas paigaldati käsivints, millel oli pidurdav toime.

Ehitamisprotsess algas erosioonisimulaatori disainimisega joonestamisprogrammiga AutoCad Inventor. Kuna sarnase otstarbega konstruktsiooni kirjanduses ei leitud, joonistati esialgne põhimõtteline skeem, mille alusel oli võimalik kaaluda erinevaid teostusvariante (Joonis 5.1).

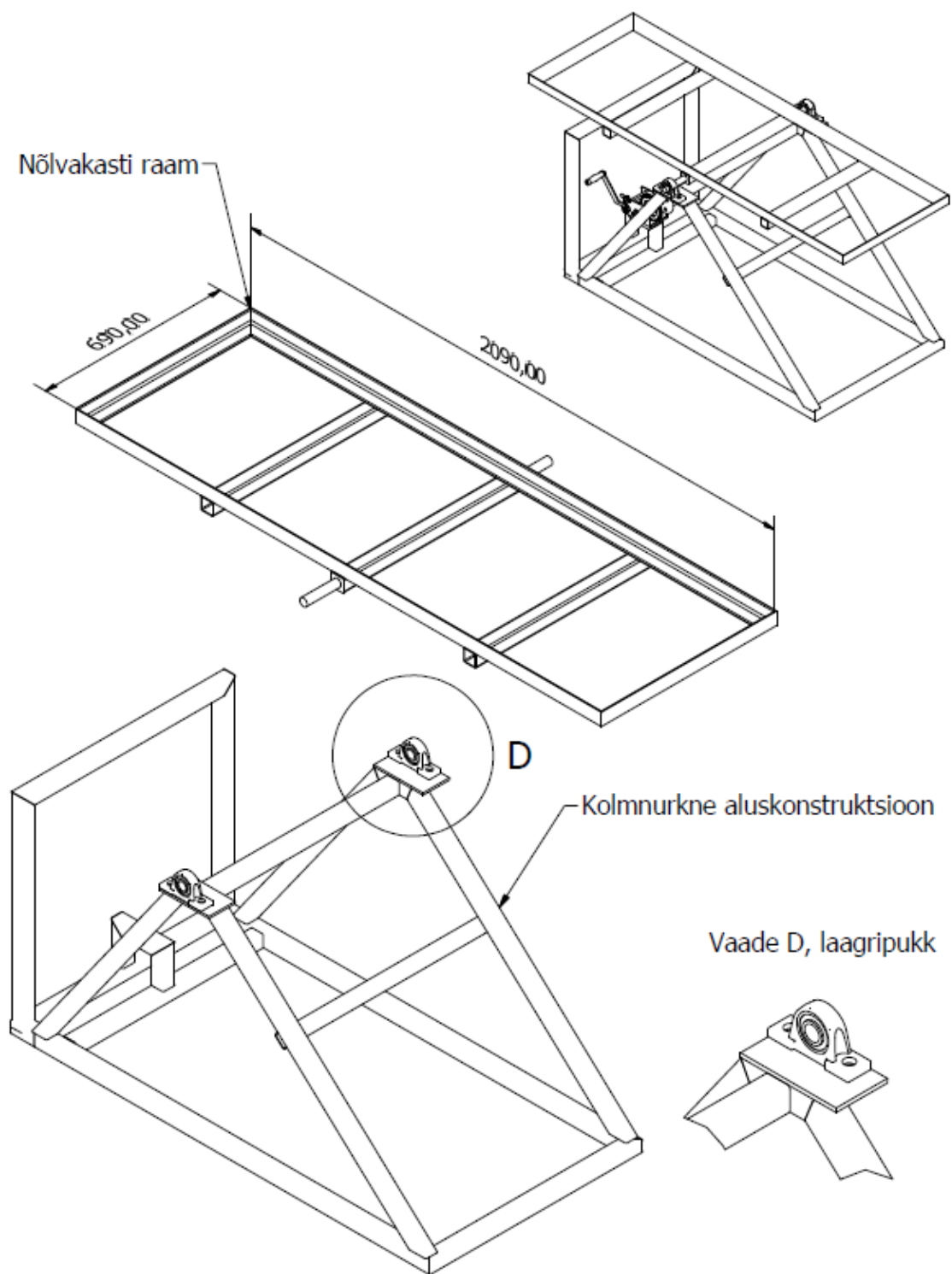
Aluskonstruktsioon oli disainitud kahes osas, et oleks võimalik vajadusel kergemalt transportida. Üks osa oli kolmnurkne aluskonstruktsioon, mis võtab vastu põhikoormuse, eraldi teine osa oli nõlvakasti raam, kuhu sisse ehitatakse nõlvakast. Kolmnurkne aluskonstruktsiooni osa kõrguse joonestamisel tuli arvesse võtta seda, et nõlvakasti pidi olema võimalik ka 1:1 nõlvusele seadistada. Aluskonstruktsiooni joonestamisel peeti silmas ka ohutust, seetõttu on aluskonstruktsiooni tagaosas toestav raam, mis ei lase nõlvakastil tagasi kukkuda. Eesotsas on kahe külje vahele mõeldud vertikaalne raud, mis fikseerib nõlvakasti maksimaalseks nõlvuseks 1:1. Kasti aluskonstruktsiooni

dimensioneerimisel pidi arvestama kasti materjali arvatava paksusega, et hiljem katseala ei jääks liiga väikeseks, seega dimensioneeriti kasti jaoks 2,09 x 0,69 m ala. Kaks osa ühendati omavahel laagripukkidega. Nõlvust reguleeritakse käsivintsi abil. Käsivintsi raam on kinnitatud kolmnurkse aluskonstruktsiooni külge ning vintsi tross on ühendatud nõlvakasti raamiga. Vintsile on ette nähtud pidurdav funktsioon, seega peab nõlvakasti väljaviikude poolne ots olema raskem, et süsteem funktsioneeriks eesmärgipäraselt. Selle tarbeks kinnitati nõlvakasti raami väljaviikude poolse otsa külge lisaraskus, et nõlvuse muutmise oleks sujuvam. Vintsi abiga on võimalik nõlvust muuta 2 kraadi täpsusega. Nõlvuse määramiseks paigaldati laagripukki läbiva varda ümber mall, mille abil sai määrata missuguses asendis nõlvakast ajahetkel oli.

Arvestades kõiki kriteeriume, joonestati valmis 3D mudel vajaminevast konstruktsioonist (Joonis 5.2). Erosioonisimulaatori metallaluskonstruktsiooni töö- ning keevitusjooniseid aitas koostada Andreas Mänd firmast AV Group OÜ, kes töötab ettevõttes projekteerijana. Sama ettevõtte teostas ka konstruktsiooni ehituse ning tarnimise.



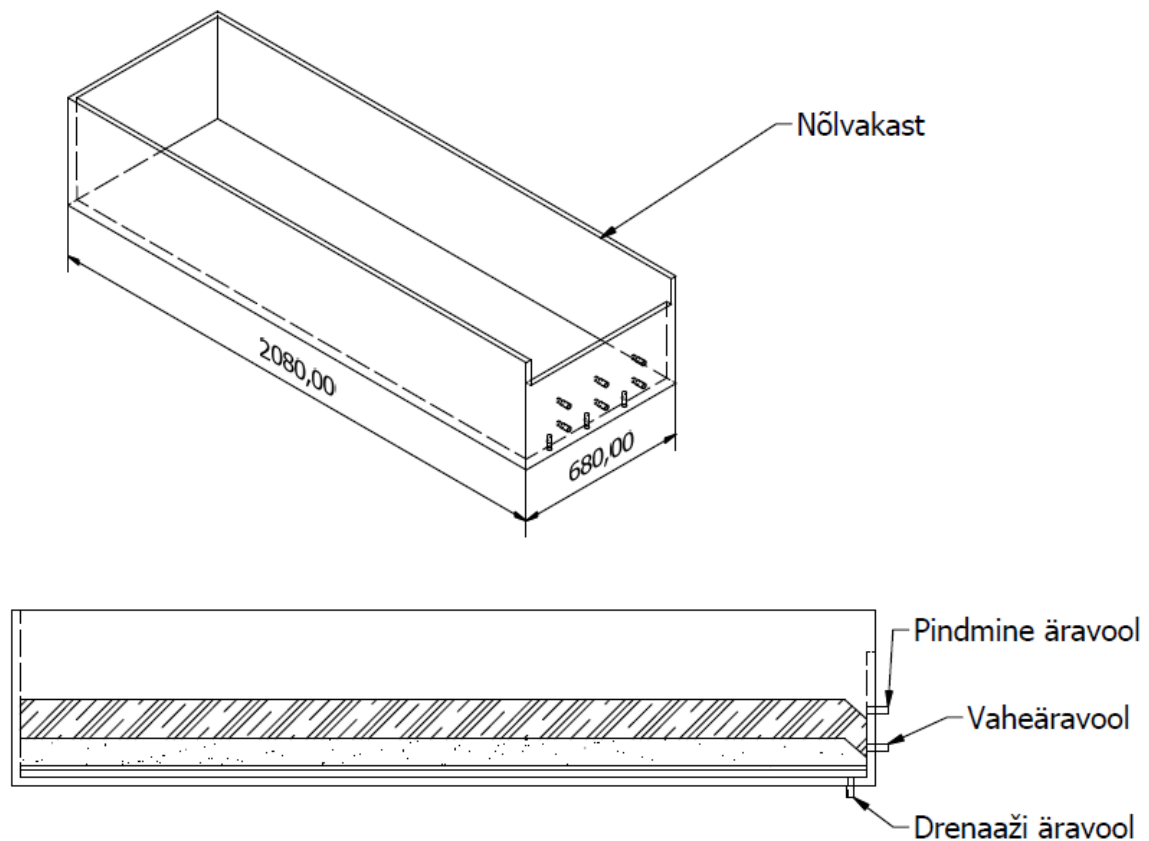
Joonis 5.1. Erosioonisimulaatori põhimõtteline skeem.



Joonis 5.2. Erosioonisimulaatori aluskonstruktsioon.

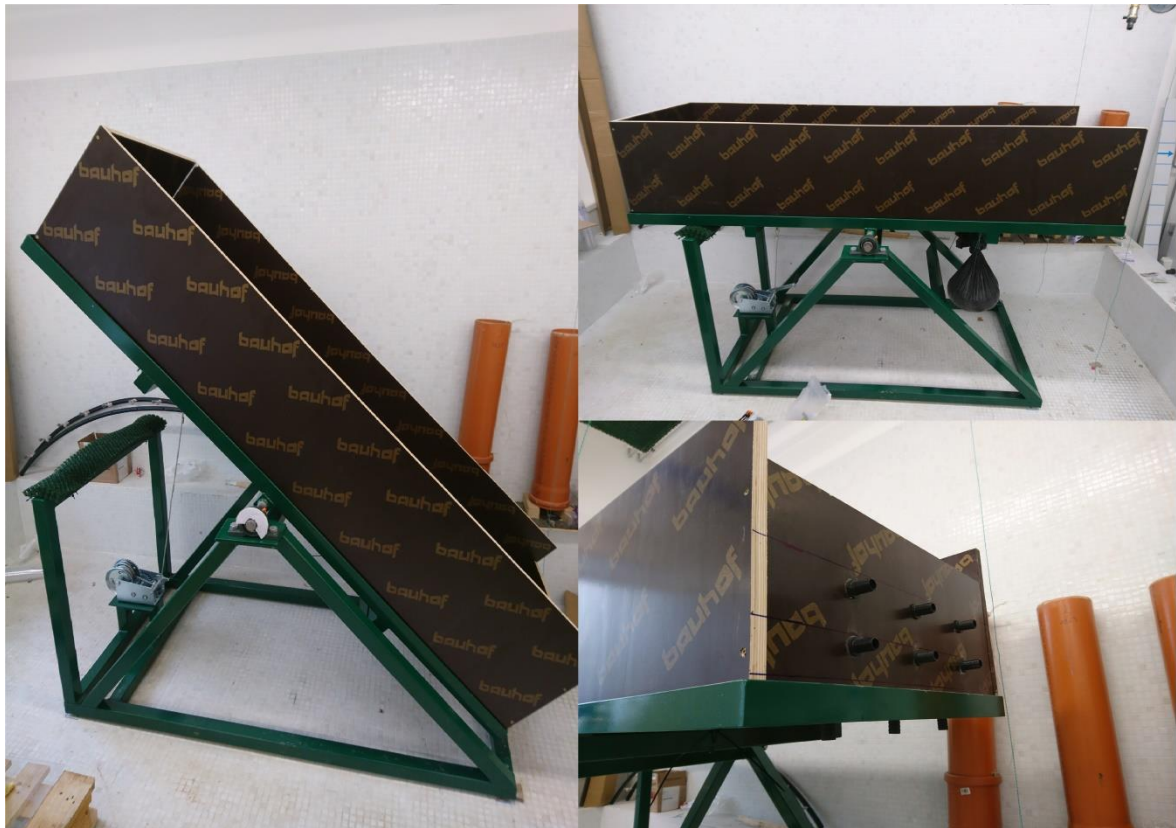
Erosioonisimulaatori kolmandaks osaks oli nõlvakast, kuhu sisse sai paigutada nõlva katsekeha, mis koosneb katte-, alus- ning drenikihist. Kõikidele kihtidele pidi võimaldama väljavoolu, et oleks võimalik uurida nõlvakastis toimuvaid vee liikumise protsesse. Nõlvakast ehitati veekindlast vineerist ning enne katsetamisi tehti kast

hermeetiliseks, et ei tekiks veekadu kohtadest, kus pole ettenähtud ja oleks täpselt võimalik koostada veebilanss, st mõõta sademete vooluhulga jagunemist pindmiseks, vahe- ja dreeniäravooluks. Igale kihile konstrueeriti 3 väljaviiku (kokku 9), mille kaudu juhitakse vesi kastist välja mõõteanumatesse. Mõõteanumatesse kogutud vee mahtude põhjal on võimalik teha järeldusi pindmise, vaheäravoolu ning dreenažikihi läbivoolu ja pinnaste veeläbilaskvuse kohta (Joonis 5.3).



Joonis 5.3. Nõlvakast.

Nõlvakast ühendati metallkonstruktsiooniga nii, et hiljem oleks võimalik vajadusel kasti eemaldada või vahetada, näiteks kui tekib vajadus katsetada teist pinnast teises kastis. Valmisehitatud erosioonisimulaator on toodud alljärgneval joonisel (Joonis 5.4).



Joonis 5.4. Erosioonisimulaator. Vasakul nõlvus 1:1, paremal üleval horisontaalne asend, paremal all väljaviigud äravooludele.

5.1. Kasutatavate pinnaste parameetrid

Antud töös kasutatakse nõlvakasti katsekehas kolme pinnast: aluspinnas mis kujutab endast kivist saviliiva ning kahte erinevat kompostmaterjali. Aluspinnas paigutati drenaažikihi peale, kompostmaterjali katsetati kasutamiseks nõlvakatteks. Hangitud materjalide kohta ei olnud saadaval mahu, poorsuse ning veeläbilaskvuse parameetreid, mida on vaja teada antud töö raames. Lisaks eeltoodud parameetritele määrati liivpinnaal ka terastikuline koostis.

Kattematerjalina kasutatavaid kompostmaterjalid olid mõlemad reoveesette kompostmaterjalid: anaeroobse kääritamise teel saadud kompost ning aunkompost. Materjalide kohta oli teada umbkaudselt koostisosade suhted. Anaeroobne kompostmaterjal koosneb umbes 1/3 reoveesettemudast, 1/3 turbast ning 1/3 liivast. Aunkompost oli segatud 1/3 reoveesettemudaga, 1/3 turbaga ning 1/3 saepuruga. Anaeroobselt kääritatud kompost oli tarnimise hetkel tunduvalt suurema veesisaldusega

kui aunkompost, mis oli praktiliselt läbi kuivanud, sest esimene materjal oli hoiustatud lagedal platsil, kuid teist materjali hoiti varikatuse all.

5.1.1. Aluspinnase terastikuline koostis

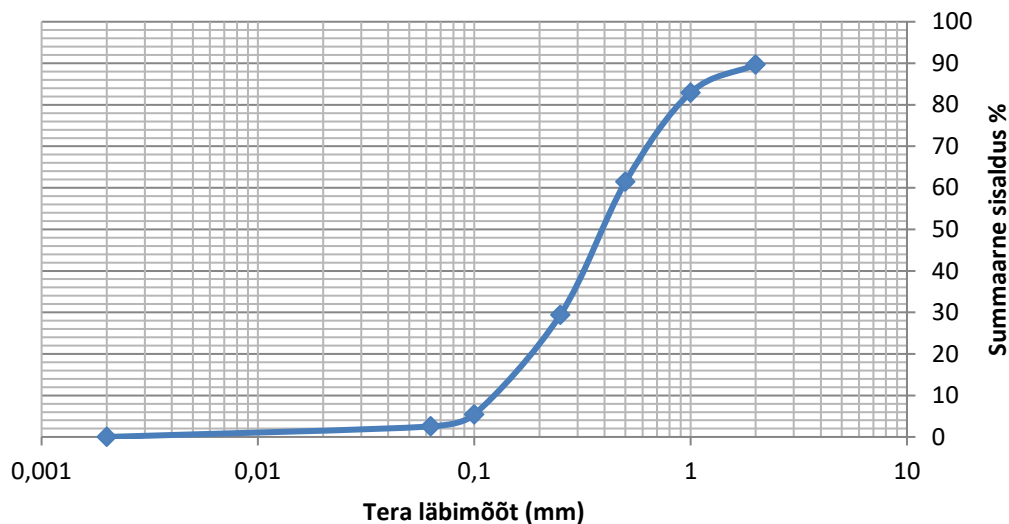
Aluspinnase terastikulise koostise määramiseks viis Põllumajandus- ja keskkonnainstituudi mullaosakonna laborant Raja Kährik läbi sõelanalüüsi antud pinnasele. Sõelanalüüsi läbiviimiseks kasutati erinevate läbimõõtudega sõelasid. Ülemine sõel on kõige suurema avasuurusega, järgmised sõelad on järjest väiksemate avadega. Igale sõelale jäänud osa kuivatati, kaaluti ning saadud andmetest tulenevalt arvutati protsendiliselt terastikuline koostis.

Sõelanalüüsi tulemused koondati tabelisse (Tabel 5.1) ning arvutati välja fraktsioonide summa % alustades jämedamast fraktsioonist.

Tabel 5.1. Aluspinnase sõelanalüüsi tulemused.

Sõela number	Fraktsioonid mm %		Fraktsioonide summa %	
			Jääk sõelal	Läbi sõela
2	2	10,32	10,32	89,68
1	1	6,74	17,06	82,94
0,5	0,5	21,48	38,54	61,45
0,25	0,25	32,02	70,56	29,43
0,1	0,1	24,02	94,58	5,41
0,063	0,063	2,87	97,46	2,54
<0,063	0,002	2,54	100,00	0,00

Saadud tulemused toodi välja graafikule, mille horisontaalteljel on teraosakeste läbimõõdu logaritm ja vertikaalteljel kasutatud läbimõõduga sõela läbinud pinnaseosakeste kaalu ja pinnaseproovi kogukaalu suhe protsentides. Ühendades graafikule saadud punktid, leiti kasutatud aluspinnasele sõelanalüüsi sõelkõver (vt Joonis 5.5), mille alusel on pinnase nimetus FAO järgi liiv (Astover et al. 2012).



Joonis 5.5. Aluspinnase sõelkõver.

5.1.2. Pinnaste mahumasside, poorsustegurite ja küllastusastmete määramine

Küllastunud veemahutavuse määramiseks küllastatakse pinnase proovid veega, hoides neid alt avatuna vette uputades vees 24 tundi. Sellise küllastamise korral peaks enamus poore olema veega täidetud. Seejärel kaalutakse proovid koos proovianumatega, eelnevalt peab kaaluma ka proovianumad. Proovid fooliumkarpides paigutatakse koos pinnasega kuivatusahju, kus neid kuivatatakse püsiva kaaluni temperatuuril 105 °C. Antud temperatuuril eraldub pinnaseproovist kogu vaba vesi ning enamus seotud veest. Veesisaldus arvutatakse valemiga 5.1 (Jaaniso 2011).

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100, (5.1)$$

kus w on pinnase veesisaldus;

m_w – pinnase mass enne kuivatamist g;

m_0 – kuiva pinnase mass g.

Kui on leitud pinnase veesisaldus, on võimalik avaldada pinnase kuivmass, looduslik poorsustegur ning suhteline tihedus. Kuivmass ρ_d on mahuühiku tahke osa mass, mõõtühikuks on g/cm³. Kuivmass sõltub tahke osa tihedusest ja poorsusest ning arvutatakse valemiga 5.2 (Leppik 2012).

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01w}, (5.2)$$

kus ρ_d on kuivmahumass;

ρ – pinnase mahumass g/cm³;

w – pinnase veesisaldus.

Järgnevalt saab avaldada pinnaseproovi loodusliku poorsusteguri, mis on pinnaseosakeste ja pooride mahu suhe. Pinnase tihenemisel on pooride mahu samaväärne poorsusteguriga ja leitakse valemiga 5.3 (Jaaniso 2011).

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, (5.3)$$

kus e on poorsustegur;

ρ_s – keskmine kõvade osakeste tihedus pinnases (arvestatakse 2,66 g/cm³);

ρ_d – keskmine arvutatud skeleti mahumass, g/cm³.

Käesolevas töös kasutati kolme pinnast. Aluspinnaseks kasutati kivist saviliiva ning kattematerjalina kasutati komposti kahest kohast, mis olid erinevate omadustega. Esimene katsetatav kattematerjal oli aunkompost. Nende poolt saadud kompost oli segatud 1/3 reoveesettemudaga, 1/3 turbaga ning 1/3 saepuruga. Anaeroobselt kääritatud kompost oli segatud 1/2 mudaga ning 1/2 turbaga ja hiljem veel segatud liivaga teadmata hulgal. Kasutades ülaltoodud metoodikaid ning valemeid 5.1 kuni 5.3, arvutati antud töös kasutatavate pinnaste parameetrid, mis on näidatud alljärgnevas tabelis (Tabel 5.2).

Tabel 5.2. Pinnaste parameetrid.

Andmed:	Ühik	Aluspinnas	Aunkompost	Anaeroobselt kääritatud kompost
Rõnga maht	cm ³	236,13	236,13	236,13
Rõnga ja plaadi mass	g	245,96	246,00	244,79
Fooliumkarbi mass	g	19,13	19,13	19,13
Küllastunud pinnase mass	g	458,04	236,33	292,89
Kuiva pinnase mass	g	383,97	49,29	120,5
Pinnase veesisaldus	%	19,29	379,47	143,06
Kuivmass	g/cm ³	1,63	0,21	0,51
Poorsustegur		0,64	11,74	4,21

5.1.3. Pinnaste veejuhtivuse määramine

„Veejuhtivus pinnases ehk filtratsioonivõime on pinnase omadus pooride kaudu vett juhtida.“ (Jaaniso 2011). Vesi liigub pinnases pooride ning lõhede kaudu erinevate tegurite

toimel, nagu gravitatsioonijõu, temperatuuride erinevuste mõjul, osmootsest rõhust, kapillaarjõu või mõne muu teguri mõjul (Maastik et al. 1995). Veeliikumist saab jaotada laminaarseks ning turbulentseks. Kuna pinnastes liigub vesi aeglaselt ning pooride suurused on väikesed, saab väita, et pinnases leiab aset üldjuhul vee laminaarne liikumine (Jaaniso 2011).

Laboris määratakse pinnase filtratsioonimoodul spetsiaalse seadme abil, mis arvutustel põhineb Darcy seadusele ning kasutab pinnase veeläbilaskvuse määramiseks alljärgnevat valemit 5.4 (Meter Group 2018).

$$K_S = -\frac{L*V}{H*A*t}, (5.4)$$

kus K_S on pinnase veeläbilaskvus;

L – pinnaseproovi kõrgus rõngas cm;

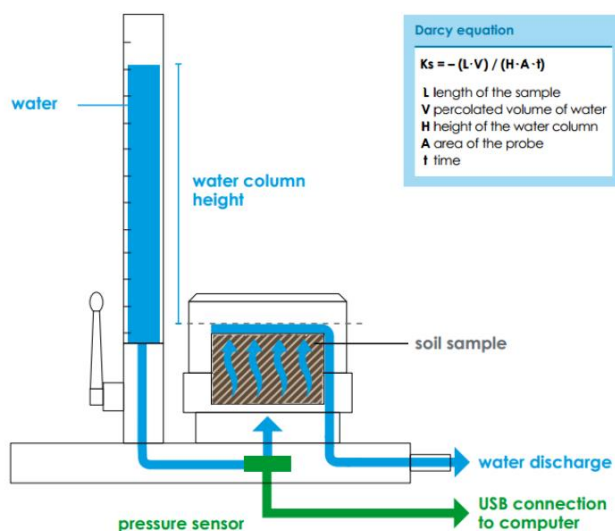
V – katsekeha läbinud vee maht cm^3 ;

H – veesamba kõrgus cm;

A – katsekeha ristlõikepindala cm^2 ;

t – aeg s.

Antud töös leiti kolmele pinnasele filtratsioonimoodulid kasutades KSAT seadet, mis kasutab veejuhtivuse arvutamiseks ülaltoodud metoodikat. Vajaminev seadeldis oli olemas Eesti Maaülikooli vesiehitus ja veekaitse osakonna laborites (Joonis 5.6).



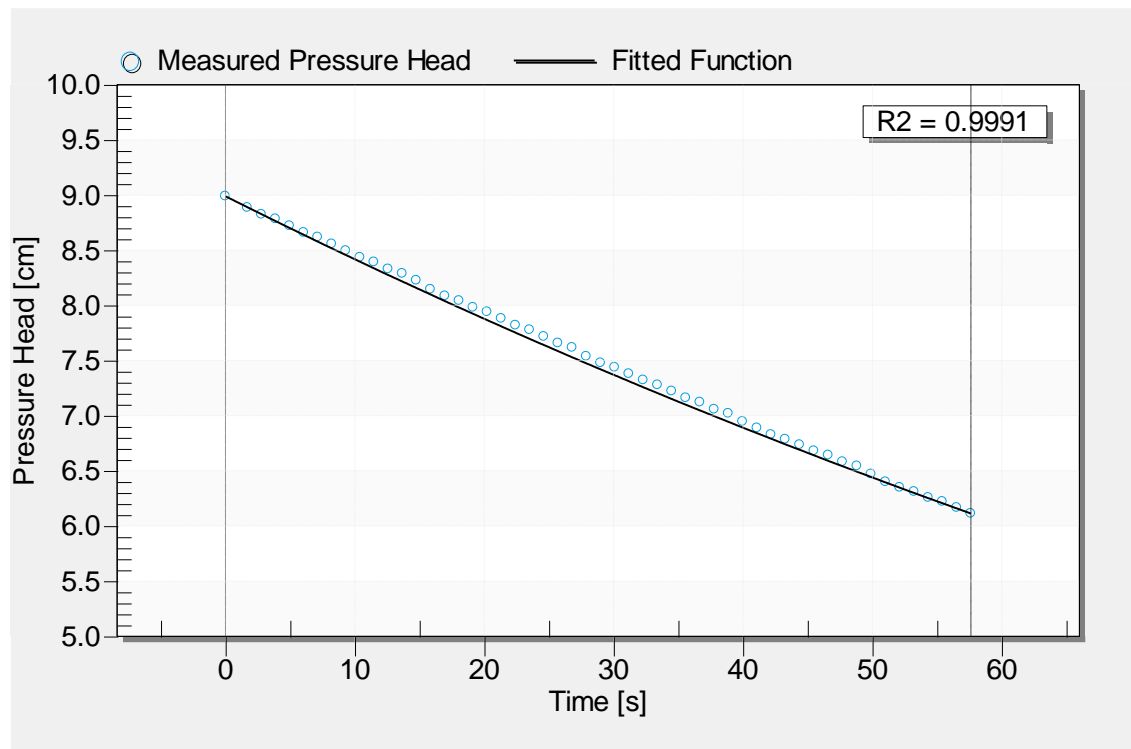
Joonis 5.6. KSAT filtratsioonimooduli määramise seadeldis (Meter Group 2018).

Filtratsioonimooduli määramiseks paigutati pinnased üksteise järel metallrõnga sisse. Pinnas asetati rõngasse nii, et pinnase ja rõnga vahele ei satuks õhuavasid või tühimikke. Proovipinnaseid hoiti enne katsetamist seadmel 24 tundi vee sees, nii küllastati proov vee liikumisega alt üles. Nii surub ülesliikuv vesi pinnaseproovides oleva õhu välja ning saavutati peaaegu täielik veega küllastus. Pinnase filtratsioonimoodul arvutati tarkvaraga, mis kasutas pinnase veejuhtivuse määramisel valemit 5.6.

Aluspinnase veejuhtivuse katsel arvutas KSAT tarkvara filtratsiooni mooduliks järgmised parameetrid :

- K_s 23° juures - 231 cm/d; $2,69 \times 10^{-5}$ m/s;
- K_s 10° juures - 166 cm/d; $1,93 \times 10^{-5}$ m/s.

Katse kestus oli 57 sekundit. Katseaegse rõhukao muutust ajas näitab alljärgnev joonis (Joonis 5.7).

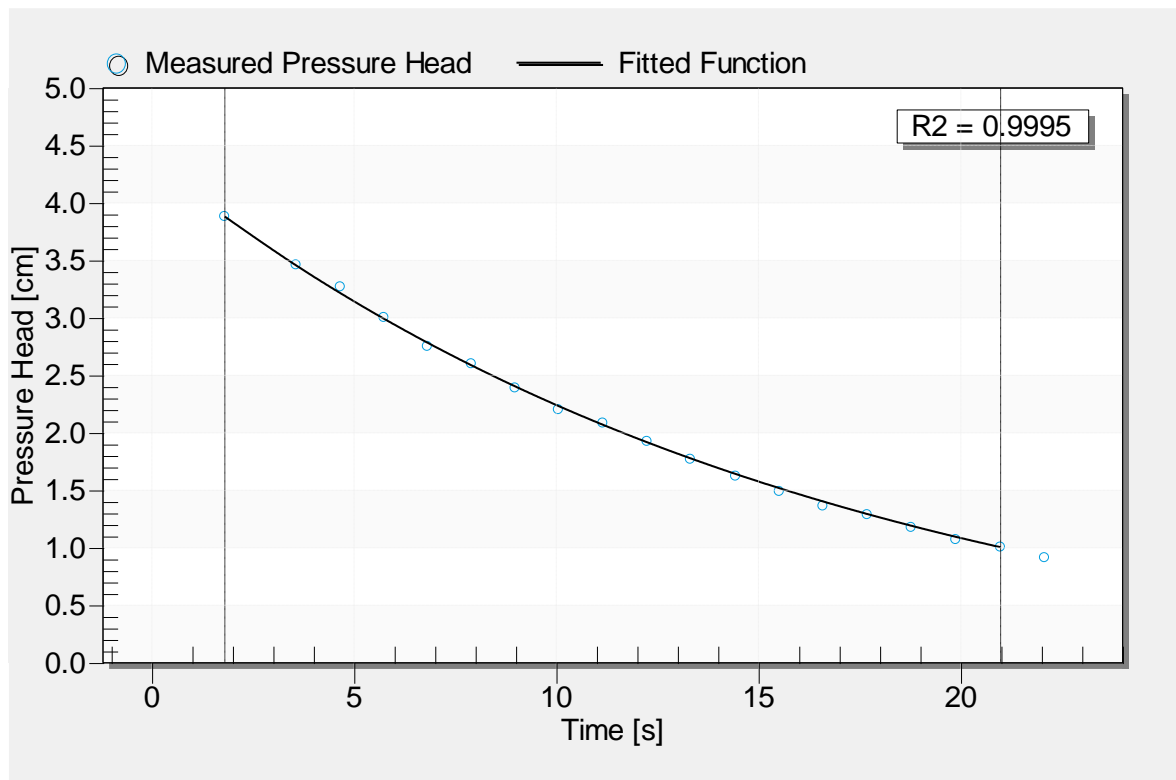


Joonis 5.7. Filtratsioonimoodul aluspinnasel.

Aunkompostiga saadud katse tulemused on järgmised:

- Ks 23° juures - 2440 cm/d; $2,84 \times 10^{-4}$ m/s;
- Ks 10° juures - 1740 cm/d; $2,02 \times 10^{-4}$ m/s.

Katse kestus oli 22 s. Võrreldes liivpinnasega on aunkompost äärmiselt vettjuhtiv materjal, sellest tulenevalt oli ka katse pikkus ajaliselt piiratud (Joonis 5.8).

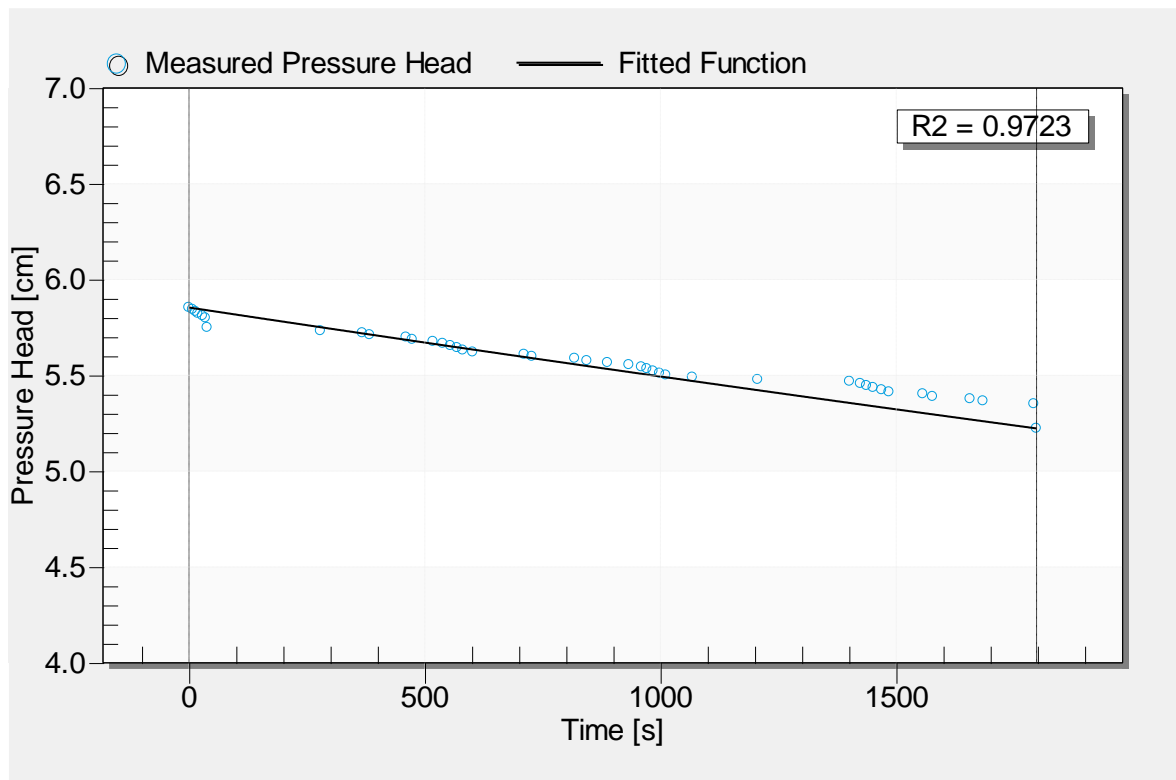


Joonis 5.8. Filtratsioonimoodul aunkompostil.

Anaeroobselt kääritatud kompostmaterjali filtratsioonimooduli määramisel saadi järgmised tulemused:

- Ks 23° juures - 2,5 cm/d; $2,88 \times 10^{-7}$ m/s;
- Ks 10° juures - 1,8 cm/d; $2,04 \times 10^{-7}$ m/s.

Katse kestis 1797 sekundit. Anaeroobselt kääritatud kompostmaterjali veejuhtivus oli äärmiselt madal. Teoreetiliselt oleks võinud katse töötada senikaua, kuni seadme veesambas olev vesi oleks pinnasest läbi jõudnud. KSAT seadme manuaalis on savikate ja teiste halvasti vettjuhtivate pinnaste katsetamise kohta öeldud, et katset ei pea ootama lõpuni, vaid piisab sellest, kui veetase on sambas alanenud 1 cm (Joonis 5.9).



Joonis 5.9. Anaeroobselt kääritatud kompostmaterjali filtratsioonimoodul.

Leitud kattematerjalide parameetreid võrreldes saab öelda, et kattematerjalina katsetatakse erosioonisimulaatoril kahte väga erinevat kompostmaterjali: aunkomposti, mis on väga suure veeläbilaskvusega, ning anaeroobselt kääritatud komposti, mille veejuhtivus omadused on lähedased savika materjaliga.

5.2. Drenaažikihi projekteerimine

Antud töös oli eesmärgiks uurida pindmise äravoolu teket. Nähtuse uurimise eelduseks peab katsekehal olema selline drenaažikiht, mis suudaks vastu võtta pinnasest tuleva vee ning selle ära juhtida väljavoolu. Seetõttu ei tohi drenaažikiht ise osutada takistavaks teguriks, nõ pudelikaelaks, pinnasevee äravoolul.

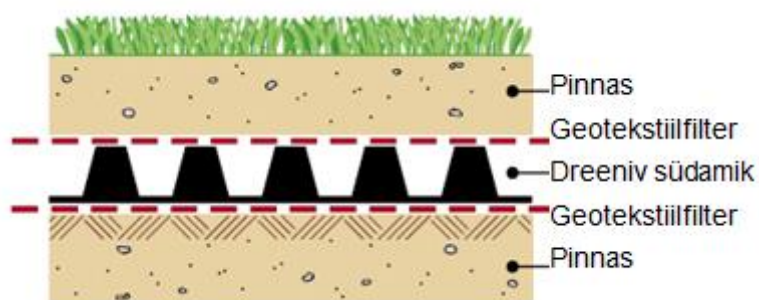
Drenaažikihi otsustati kasutada geosüntetikat. Esmalt pidi uurima missuguseid geosüntete kasutatakse filtreerimise ning drenimise eesmärkidel.

Mulde projekteerimisel tuleb arvesse võtta vee liikumine mulde sees ja aluspinnastes. Et kindlustada mulde säilimine, peab tagama muldesse sattuvate ja aluspinnastes olevate vee

normaalne liikumine. Seejuures tuleb võimaldada muldest ja aluspinnastest veel vabalt välja voolata, vältimaks pinnasekihtide veega küllastumist. Pinnaerosiooni üks suurimaks tekkepõhjuseks ongi pinnase veega küllastumine, sest kui pinnas ei suuda enam vett vastu võtta, st ületatakse pinna infiltratsioonivõime, ja vesi hakkab kogunema pinnale ning pindmise äravoolu tõttu haaratakse kaasa pinnaseosakesi (Maanteeamet 2006).

Dreenivate vahekihtide ehitamiseks on mitmeid variante, enamlevinuimaks variandiks on täitematerjalist (filtratsioonimooduliga $> 2,0 \text{ m/ööp}$) rajatud vahekiht, mis on ummistumise vältimiseks ümbritsetud filterkangaga. Sellise vahekihi rajamine võib osutuda kulukaks, seega alternatiiviks on võimalik kasutada aluspinnase all hea tasapinnalise veejuhtimisomadusega geosünteti: paks mittekoatud geotekstiil või spetsiaalne dreniv geokomposiit. Pikemaajaliste rakenduste puhul ei tohiks paksu mittekoatud geotekstiili eelistada, kuna võib tekkida tekstiili ummistumise oht (Rankilor 1994).

Dreenimiseks kasutatav geokomposiit tuum koosneb jäigast ning poorsest sünteetilisest materjalist, mis on ümbritsetud ühelt või mitmelt küljelt filtreeriva funktsiooniga geotekstiiliga. Tuumaks on kokkusurumatu kõrgete veejuhtimisomadustega kärg, mille eesmärgiks on juhtida vett mööda oma tasapinda konstruktsioonist välja. Sisuliselt käitub kiht nagu дренаážitoru, sellist geokomposiiti on ka nimetatud lapikdrenaážiks. Geotekstiili Typar SF tehnilises manuaalis on toodud selgitav joonis sellise geokomposiitmaterjali kasutamise kohta (Joonis 5.10).



Joonis 5.10. Geokomposiit дренаáž (DuPont Typar Geosynthetics 2016).

Geokomposiidi kasutamisel peab arvestama kasutatava filterkanga sobivust teda ümbritseva pinnasega. Kasutatavatesse pinnasetingimustesse sobiva geotekstiili valimine sõltub järgmistest parameetritest:

- geotekstiili omadused: struktuur, veeläbilaskvus, pooriava suurus, kokkusurutavus;
- pinnase omadused: mahukaal, terastikuline ülesehitus, plastsus ja nidusus;
- paigaldustingimused: mehaaniline kahjustamine ja pinnase veesisaldus paigaldamisel (Maanteeamet 2006).

Filterkangas peab veel võimaldama vabalt liikuda, et ei tekiks pinnases märkimisväärset hüdrostaatilise rõhu kasvu. Samas ei tohi filtreeriv kiht lubada liigset pinnaseosiste liikumist drenivasse kihti. Seega on geotekstiili valimisel kaks põhilist tegurit, mida tuleb üle vaadata: ummistuskindlus ja veejuhtimine.

5.2.1. Geotekstiili ummistuskindlus

Pinnastel mahukaaluga üle $1,7 \text{ g/cm}^3$, ei ole kalduvust pinnaseosiste liikumisele ja geotekstiili ummistumisele, kuna tegu on seesmiselt stabiilsete pinnastega. Väiksemate mahukaalude juures suureneb pinnases olevate pooride arv. Pinnases tekivad avaused, kus vesi koos peenemate pinnaseosakestega saab liikuda ning kasvab geotekstiili ummistumise tõenäosus (Rankilor 1994).

Filterkanga valik algab filtreeritava pinnase terastikulise koostise määratlemisega ehk sõelkõvera leidmisega. Antud parameetrid on aluspinnasele leitud alajaotises 5.1.1.

Filtreeriva geotekstiili ummistuskindluse määramiseks kasutatakse pinnaseosakeste suuruse D_{90} ja kattematerjali pooride ava O_{90} suhet. D_{90} on filtreeriva kangaga ühenduses oleva pinnase terasuurus, millest 90 % on väiksemad. Kattematerjali valiku kriteeriumi O_{90}/D_{90} suhte kohta on esitatud erinevaid väärtusi. Maanteeameti geosünteedide kasutamise juhises on kasutatud Dierickx ja Van der Sluys poolt tuletatud ja Stuyti poolt 1992 aastal teostatud uuringutega kinnitatud :

- $O_{90}/D_{90} \leq 2,5$, kattematerjalide puhul mille paksus on väiksem kui 1 mm;
- $O_{90}/D_{90} \leq 5$, kattematerjalide puhul mille paksus on üle 5 mm.

Kattematerjalidele paksusega 1 mm ja 5 mm vahel, soovitatakse suhtarv leida interpoleerides astmeliselt või lineaarselt. Astmeliselt interpoleerides saab jagada O_{90}/D_{90} suhte kaheks:

- $O_{90}/D_{90} \leq 3,0$, kattematerjalide puhul mille paksus jääb 1 mm ja 3 mm vahele;

- $O_{90}/D_{90} \leq 4,0$, kattematerjalide puhul mille paksus jääb 3 mm ja 5 mm vahele.

Filtreeriva kanga pooriava O_{90} suuruseks soovitatakse minimaalselt 0,2 mm, et leevendada ummistumise riski, mis vähendaks kanga veeläbilaskvust. Ummistumine on tõenäolisem ebastabiilse struktuuriga pinnastes ja juhul, kui pinnases on domineeriv üks fraktsioon (Vlotman et al. 2000). Suureteralistes pinnastes ($D_{90} \geq 0,2$ mm) võib O_{90}/D_{90} suhtarv olla ka alla 1, tingimusel et geotekstiili O_{90} väärtus on vähemalt 0,2 mm ning sellest tulenevalt ei teki veeläbilaskvuse vähenemist (Vlotman et al. 2000).

5.2.2. Geotekstiili veeläbilaskvus

Pinnastesse filtreerimis otstarbeks paigaldatava geosünteedi valikul soovitab Dr Jean Pierre Giroud võrdväärse vooluhulga tagamiseks kasutada kangast, mille veeläbilaskvus oleks kümnekordne ümbritsevate pinnaste filtratsioonimoodulist (DuPont Typar Geosynthetics 2016).

Sobiva geotekstiili valimisel leiti laboritingimustes filtreeritava pinnase filtratsioonimoodul K_p (autori poolt teostatud arvutustes tähistatud K_s). Sobiva geotekstiili leidmiseks vajamineva veeläbilaskvuse parameetri leidmiseks saab kasutada järgmist valemit 5.7 (Maanteeamet 2006).

$$K_{text} \geq M * K_s, (5.7)$$

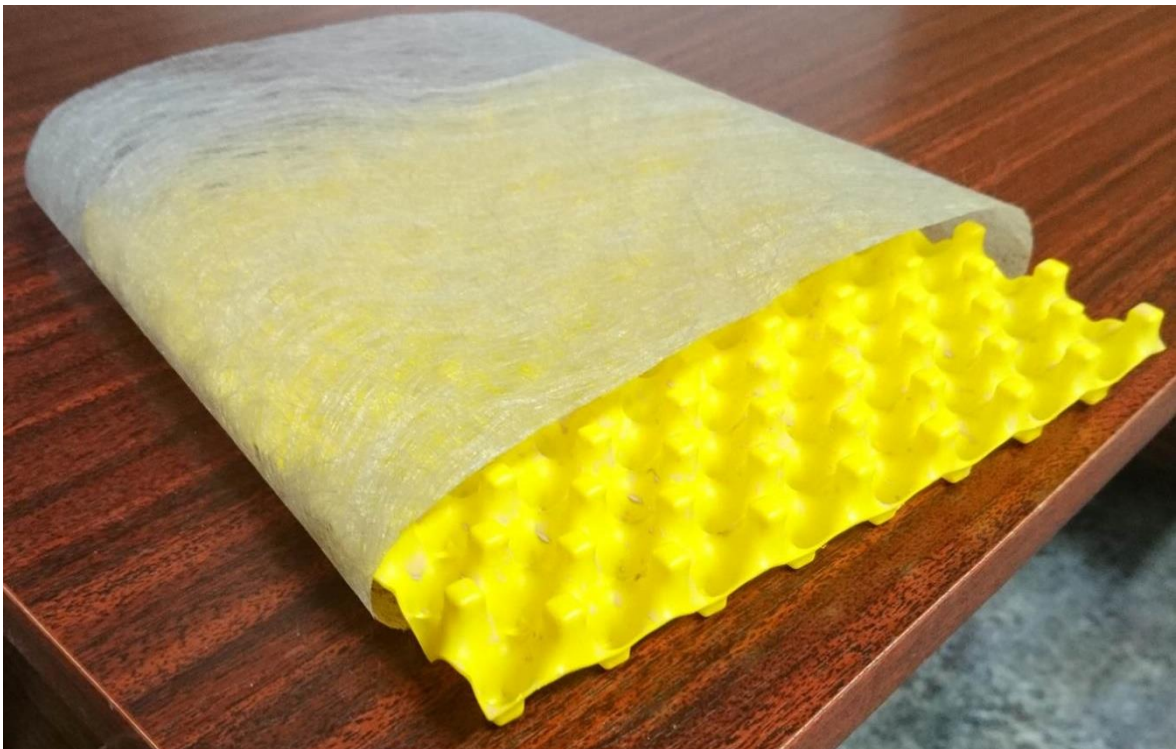
kus K_{text} on geotekstiili veeläbilaskvus m/s;

M – koefitsient, mille väärtuseks üle 2 mm paksuse geotekstiilide puhul 10, õhukeste mittekoatud geotekstiilide juures 5;

K_s – pinnase veeläbilaskvus, m/s.

5.3. Dreenihi geokomposiit StabiDrain

Käesoleva töö erosioonisimulaatori nõlvakasti dreenihiks valiti geokomposiit StabiDrain (Joonis 5.11). Konkreetse materjali valiku kasuks otsustas tugev dreeniv südamik, mis suudaks vastu võtta nõlvakastis katsetatavad pinnased. Dreenivat südamikku ümbritseb kahelt poolt filtreeriva funktsiooniga geotekstiil Typar SF 20. Alljärgnevalt kontrolliti geotekstiili sobivust kasutatava aluspinnasega, kasutades alajaotistes 5.2.1 ning 5.2.2 toodud juhiseid.



Joonis 5.11. Geokomposiit StabiDrain.

Typar SF 20 geotekstiili hüdraulilised näitajad on loetletud alljärgnevalt :

- pooriava suurus $O_{90} - 225 \mu\text{m}$ (0,225 mm);
- veeläbilaskvus koormusel $20 \text{ kN/m}^2 - 5,2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$;
- veeläbilaskvus koormusel $200 \text{ kN/m}^2 - 3,2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Ummistuskindluse määramisel on oluline geotekstiili pooriava suurus, mis antud juhul on 0,225 mm. Alajaotises 5.1.1 leitud aluspinnase sõelkõvera järgi on pinnase D_{90} väärtuseks 2 mm. Typar SF 20 puhul on tegemist mittekootud õhukese (paksus alla 1 mm) geotekstiiliga, seega avaldub O_{90} ning D_{90} suhe järgmiselt :

$$\frac{O_{90}}{D_{90}} = \frac{0,225}{2} = 0,113$$

Kuna antud pinnas on suureteraline ($D_{90} \geq 0,2 \text{ mm}$), võib suhtarv olla ka alla 1, tingimusel, et O_{90} geotekstiilil on vähemalt 0,2 mm. Seega sobib Typar SF 20 antud pinnasega koos kasutamiseks.

Veeläbilaskvus on kasutataval aluspinnasel leitud alajaotises 3.3.3 ning väärtuseks saadi $K_s = 1,93 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Kuna Typar SF 20 on õhuke mittekootud geotekstiil, valiti M väärtuseks 5. Kasutades valemit 3.7, leiti vajalik geotekstiili veeläbilaskvus K_{text} .

$$K_{\text{text}} = M * K_s = 5 * 1,93 * 10^{-5} = 9,65 * 10^{-5} \text{ m/s}$$

Typar SF 20 hüdraulilistes näitajates on toodud 20 kN/m^2 koormuse korral veeläbilaskvuseks $5,2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, seega on veeläbilaskvuse nõue täidetud.

Geokomposiit StabiDrain kujutab endast põhimõtteliselt lamedat dreneažitoru. Komposiit on leidnud kasutust trammiteede rekonstureerimisel ning kohtades, kus on vaja drenida väikest kuid lamedat maa-ala, kus tüüpilise dreneažitoru paigaldus ei pruugi oma funktsiooni täita. StabiDrain kogub läbi ümbritseva geotekstiili vett, mis juhitakse väljavoolu. Nominaalsed vooluhulgad on toodud välja tootja Wavin France tootekataloogist (Tabel 5.3). StabiDrain geokomposiiti on toodetud kahe erineva paksusega, 20 mm ja 40 mm. Käesolevas töös kasutati 20 mm paksust südamikku.

Tabel 5.3. StabiDrain nominaalvooluhulgad (Wavin 2006).

Kalle	Nominaalne vooluhulk l/s	
	StabiDrain 20	StabiDrain 40
1%	0,15	0,45
3%	0,21	0,64
5%	0,33	1,01

6. EROSIONISIMULAATORI KATSETAMINE

Antud töö raames kasutati erosioonisimulaatoril ühte aluspinnast, ning kahte erinevat kattematerjali, milleks olid erinevate omadustega reoveesette kompostpinnased. Katsete eesmärgid olid järgnevad:

- uurida, milline on aluspinnase veejuhtivus erinevate vihmaintensiivsuste korral horisontaalses asendis;
- kindlaks teha drenaažikihi korrektne töötamine;
- uurida, millised on kahe erineva kattematerjali vett juhtivad omadused nõlvuste 1:3, 1:2 ning 1:1,5 (Joonis 6.1);
- katsetatavad vihmaintensiivsused on järgmised: 0,81; 1,21; 1,61 ning 2,31 mm/min;
- kindlaks teha äravoolumahud erinevate nõlvuste ning vihmaintensiivsuste juures;
- tulemuste põhjal teha analüüs kattematerjalide pinnaste pindmise erosiooni tekke kohta.



Joonis 6.1. Erosioonisimulaator erinevate nõlvuste korral (nõlvused 1:3, 1:2 ning 1:1,5).

Nõlvakastist väljavoolava vee hulga järgi arvutati pindmise äravoolu, vaheäravoolu ning dreneažikihi vooluhulga kasutades valemit 6.1.

$$Q = \frac{W_{\text{äravool}}}{t}, (6.1)$$

kus Q on vooluhulk väljavoolust l/min;

$W_{\text{äravool}}$ – väljavoolust mõõdetud veemaht l;

t – aeg min (väärtus 2).

Järgnevalt arvutati valemi 6.1 saadud väärtuste järgi väljavoolude intensiivsused, kasutades valemit 6.2.

$$I = \frac{Q}{S} * 100, (6.2)$$

kus I on väljavoolu intensiivsus;

Q – vooluhulk väljavoolust l/min;

S – katseala pindala, võrdne 130,02 dm³.

Vooluhulga ning pindala suhe on korrutatud 100-ga, et teisendada dm/min ühikusse mm/min.

Enne edasisi katseid oli tarvis kindlaks teha veekadu, mis on tingitud nõlvakasti mõõtmetest ja nõlvuse muutmisest. Kui suurendada nõlvakasti nõlvust, väheneb horisontaalprojektsiooni pindala, kuhu vihm langeb, seega on ka tegelik vihmaintensiivsus mõnevõrra väiksem kui on välja selgitatud vihmasilulaatori katsetamisega kasutades veearvestiga mõõdetud vooluhulka. Veekao kindlakstegemiseks erinevate nõlvuste ning vihmaintensiivsuste juures kaeti nõlvakast seesmiselt kilega ning suunati kogu tekitatud vihm pindmise äravoolu kaudu mõõteanumasse. Saadud veehulkade andmete põhjal oli võimalik selgeks teha tegelik vihmaintensiivsus, mis langeb pinnasele. Iga mõõtmise kestus oli 120 sekundit. Tegelik vihmaintensiivsus arvutati kasutades valemit 6.2. Veearvesti lugemi järgi arvutati teoreetiline intensiivsus 3. peatükis toodud meetoodika järgi. Seejärel võrreldi saadud tulemusi ning arvutati välja keskmine vahe pinnalt voolava vee ning veearvestit läbiva veehulga järgi.

Kontrollkatse sooritamisel täheldati vooluhulga vähenemist võrreldes peatükis 3 teostatud vihmasilulaatori katsetel saadud tulemustega, mis viidi läbi käesoleva töö raames aprilli keskpaigas. Sel ajal oli ühisvõrgust saadud vooluhulk suurem kui erosioonisimulaatori katsete teostamisel, mis toimusid mai keskel. Põhjuseks on ühisvõrgus toimunud ca 1 bar

rõhu alanemine. See tõi kaasa ka vihmaintensiivsuste alanemise võrreldes peatükis 3. saadud tulemustega. Uued vihmaintensiivsused vastavate solenoidklapi töörežiimide juures on järgmised :

- lahti 2,06; kinni 9,66 – vihmaintensiivsus 0,70 mm/min (varasemalt 0,81 mm/min);
- lahti 2,06; kinni 5,64 – vihmaintensiivsus 1,11 mm/min (varasemalt 1,21 mm/min);
- lahti 2,06; kinni 4,02 – vihmaintensiivsus 1,35 mm/min (varasemalt 1,61 mm/min);
- solenoidklapp avatud režiimis – vihmaintensiivsus 2,00 mm/min (varasemalt 2,31 mm/min).

Rõhu muutust võeti arvesse ning õiged vihmaintensiivsused erinevate nõlvuste korral on toodud alljärgnevas tabelis (Tabel 6.1).

Tabel 6.1. Teoreetiline ja tegelik vihmaintensiivsus erinevate nõlvuste ning vihmaintensiivsuste juures.

Teoreetiline vihma intensiivsus, mm/min	Tegelik vihmaintensiivsus, mm/min		
	Nõlvus 1:3	Nõlvus 1:2	Nõlvus 1:1,5
0,70	0,55	0,52	0,49
1,11	0,82	0,85	0,79
1,35	1,06	0,98	0,95
2,00	1,77	1,68	1,62

6.1. Aluspinnase katsed

Aluspinnase katsetamise eesmärgiks oli võrrelda katse tulemuste teel saadud pinnase veejuhtivust KSat seadmega (Meter Group 2018) mõõdetud väärtusega.

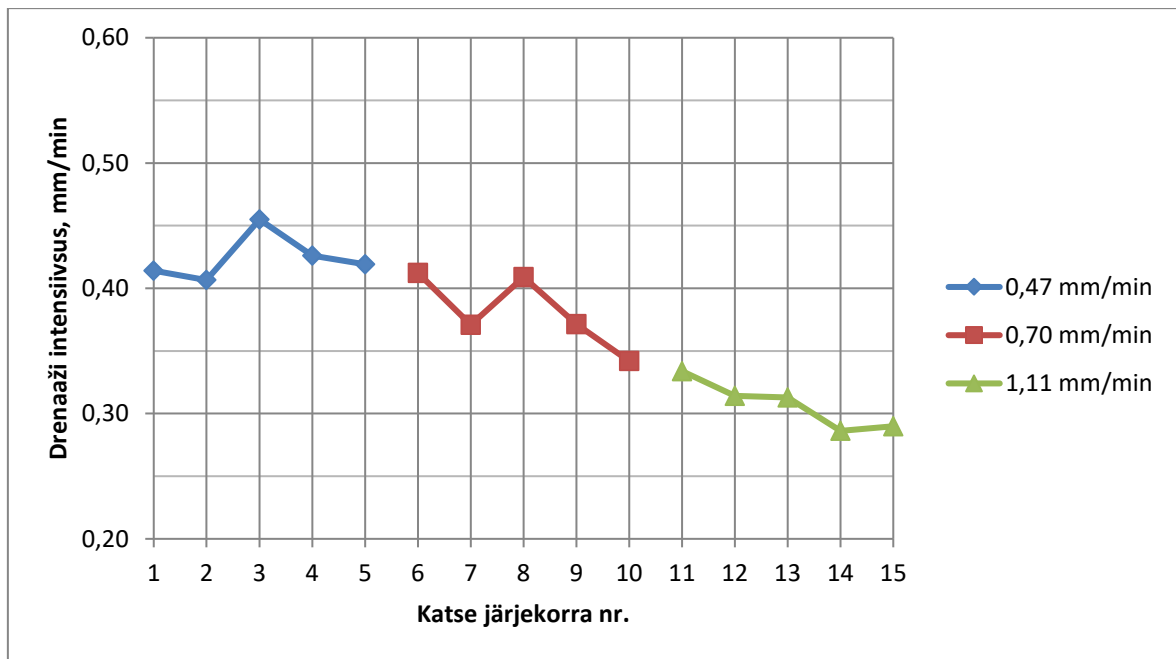
Aluspinnase katse viidi läbi horisontaalse asendiga, sest sama katse raames uuriti ka drenaažikihi käitumist reaalses olukorras. Drenaažikihi töötamine on oluline, sest kui pinnase veejuhtivust hakkab mõjutama drenaažikihi veeläbilaskvus, ei ole katse tulemused õiged. Seetõttu ei ole otstarbekas kontrollida ka suuremaid nõlvusi enne, kui drenaažikiht ei täida oma funktsiooni, kuna drenaažikihi ummistumise või väikese veeläbilaskvuse korral pinnas küllastub veega ning pindmine äravool tekib kiiremini.

Aluspinnas paigutati kasti 6 cm paksuse kihina. Katse tulemused saadi drenaažikihist välja voolava veehulga alusel. Katse käik oli alljärgnev:

- fikseeriti erosioonisimulaatori horisontaalne asend ning suleti pindmise äravoolu väljaviik;
- käivitati vihmatisimulaator teoreetilise vihmaintensiivsusega 0,47 mm/min (lahti 2,06, kinni 16,00 s);
- fikseeriti drenaažikihi ühtlane vooluhulk, kus drenaažikihist välja voolav vesi on võrdeline vihma vooluhulgaga;
- ühe intensiivsusega teostati 5 katset, seejärel seadistati simulaatorile suurema intensiivsusega vihm.

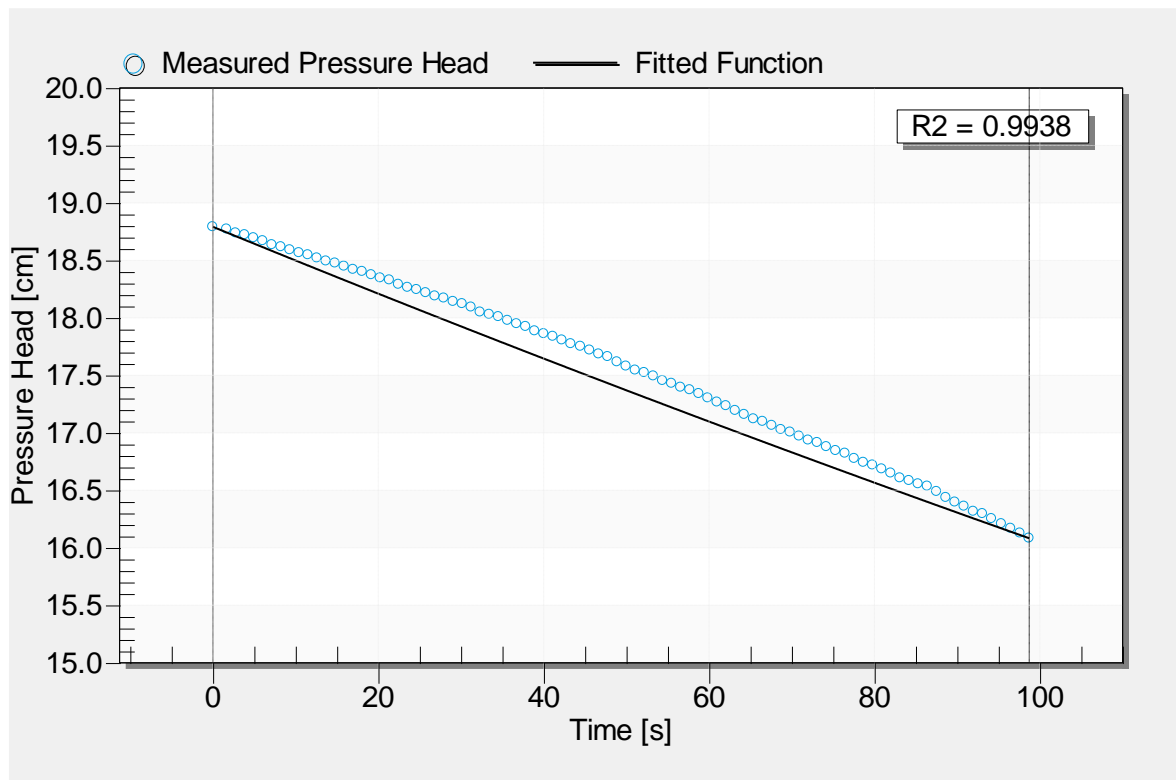
Üks mõõtmine kestis 2 minutit ehk 120 sekundit ning katsete vahele jäi alati 3 minutit aega. Seega kestis ühe vihmaintensiivsusega katse kokku orienteeruvalt 22 minutit. Drenaaži maht mõõdeti anumatega, mille kaal oli eelnevalt teada. Anum kogutud veega kaaluti ning tulemus teisendati grammidest milliliitriteks. Drenaaži väljavoolu intensiivsus arvutati välja eelnevalt välja toodud valemiga 6.1.

Katsetamist alustati vihmaintensiivsusega 0,47 mm/min. Sellise vihmaintensiivsuse juures suutis aluspinnas peaaegu kogu tekitatud vihma läbi infiltreerida ning drenaaži väljavool oli 0,41 ning 0,45 mm/min piirides. Järgnevalt tõsteti vihmaintensiivsus 0,70 mm/min peale ning korraldati katse käiku. Võrreldes eelmise vihmaintensiivsusega katseseeriaga enam drenaaži väljavool ei suurenenud, vaid oli sama, mis väiksema intensiivsusega vihmaga ning pigem väljavoolu maht langes, viimase katsega saadi väljavoolu intensiivsuseks 0,34 mm/min. Täheledatakse ka lompide tekkimist pinnasele. Järgnevalt teostati katse 1,11 mm/min vihmaga ning drenaaži väljavoolu maht alanen veelgi, saavutades viimase katsega väärtuse 0,29 mm/min. Alljärgnevalt on esitletud katse tulemusi kokkuvõtvas tabel (vt Lisa 4) ning joonis (Joonis 6.2).



Joonis 6.2. Drenaaži intensiivsus, mm/min.

Katsete tulemusi analüüsidest saab väita, et drenaažikiht ei täida vajalikku funktsiooni ning üritati selgeks teha põhjused. Kuna eelnevalt uuritud teaduskirjanduses leiti vihma tilkade tihendavat ning sulgevat mõju pinnasele, otsustati enne drenaaži geokomposiidi analüüsi läbi viia uus KSAT katse. Katse teostati pinnasega, mis võeti otse kastist vahetult pärast 0,81 mm/min vihmaintensiivsusega katseseeria viimast katset. KSAT katse andis vihmutatud pinnase uueks veeläbilaskvus näitajaks $K_s 10^\circ$ juures - 42 cm/d ehk $4,88 \times 10^{-6}$ m/s (Joonis 6.3). Enne erosioonisimulaatoril teostatud katseid, saadi KSAT seadmega samaks näitajaks aga 166 cm/d ehk $1,93 \times 10^{-5}$ m/s. Teisendades saadud väärtuse vihmaintensiivsusega samasse ühikusse, saadi väärtuseks 0,22 mm/min, mis on vastavuses drenaažikihi väljavoolava intensiivsusega. Saadud tulemuste põhjal võib väita, et drenaažikiht kasutatav geokomposiit töötab, kuid vihma tihendav ja sulguv mõju oli nii suur, et pinnase infiltratsiooni võime kahanes ligikaudu 5 kordselt.



Joonis 6.3. Vee läbilaskvuse muutus ajas.

6.2. Anaeroobselt kääritatud kompostmaterjali katsed

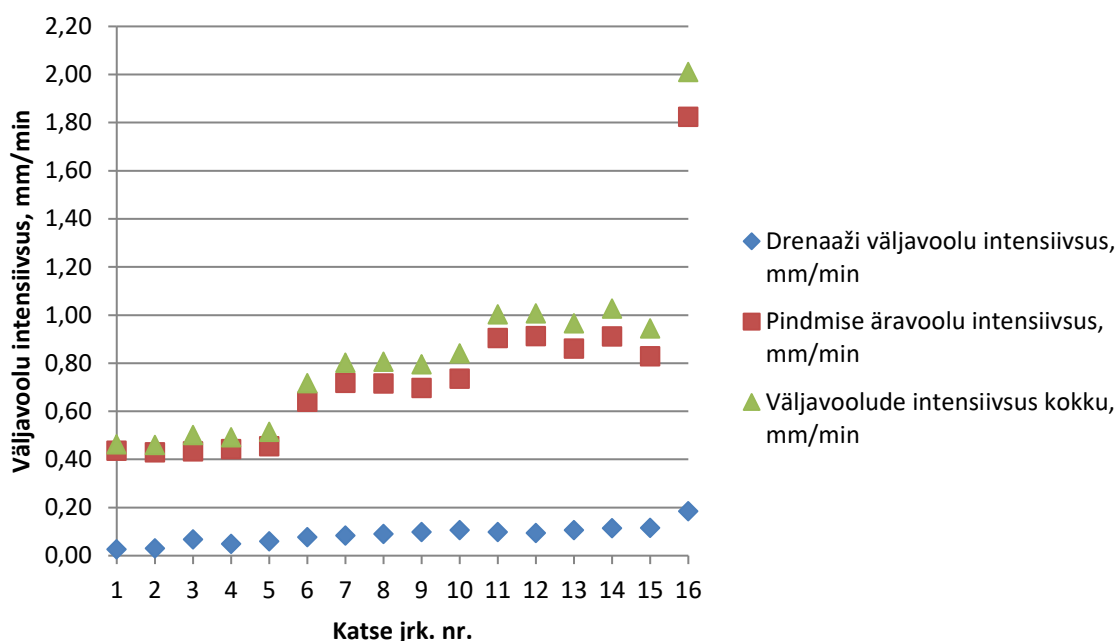
Katsetamist alustati anaeroobselt kääritatud kompostmaterjaliga. Pinnas oli paigaldamisel mõningase niiskusesisaldusega ja suhteliselt raske. Kompost oli struktuurilt sarnane tavapärase huumusmullaga. Nõlvakasti paigutati ca 10 cm paksusega kiht reoveesettekomposti (Joonis 6.4) ning katsetamist alustati nõlvusel 1:3 ning intensiivsusel 0,70 mm/min. Katse alustamisel fikseeriti vihma alguse aeg ning pindmise äravoolu, vaheäravoolu ja drenaaži väljavoolu alguse ajad. Katsed 1-5 teostati 0,7 mm/min vihmaga, katsetel 6-10 oli vihma intensiivsus 1,11 mm/min, 11-15 katsetel intensiivsusega 1,35 mm/min ning alates 16 katsest intensiivsusega 2,00 mm/min.



Joonis 6.4. Anaeroobselt kääritatud kompost.

Nõlvusel 1:3 oli materjal katsetamise alguses peaaegu kuivas olekus ehk pinnase veesisaldus oli alguses madal. Kompostmaterjalile hakkasid tekkima lombid üsna ruttu pärast vihmutamise algust, pindmine äravool hakkas tööle 22 minutit peale kunstvihma käivitamist. Drenaaž hakkas tööle minut hiljem. Katse alguse ajast oli möödunud 1 tund ja 30 minutit, kui tekkinud oli drenaažil ning pindmisel äravoolul ühtlase voolamise olukord ehk vooluhulgad ajas enam ei muutunud. Iga vihmaintensiivsusega kirjutati üles 5 mõõtmist, eelnevalt teostati mõõtmisi eesmärgiga tabada hetk, kus väljavoolu intensiivsus enam ei suurenenud. Katsed nõlvusel 1:3 kestsid kokku 2 tundi ja 45 minutit. Nõlvusel 1:3 antud pinnasega jäi peaaegu kogu tekitatud vihm pinnale, drenaaži väljavoolu osakaal oli minimaalne. Vaheäravoolu tekkimist ei täheldatud. Pindmise väljavoolu intensiivsused olid vastavuses tekitatud vihma ning eelnevalt selgeks tehtud veekao intensiivsustega. Tekitatud vihm haaras kaasa ka märgatava koguse pinnast, pindmise väljavoolu vesi oli alati musta värvi ning pinnasega segunenud. Intensiivsusel 2,00 mm/min suudeti mõõta 1

tulemus, kuna selline intensiivsus võttis kaasa liiga suure hulga pinnast, ning väljavoolu torud ummistusid pidevalt (Joonis 6.5).

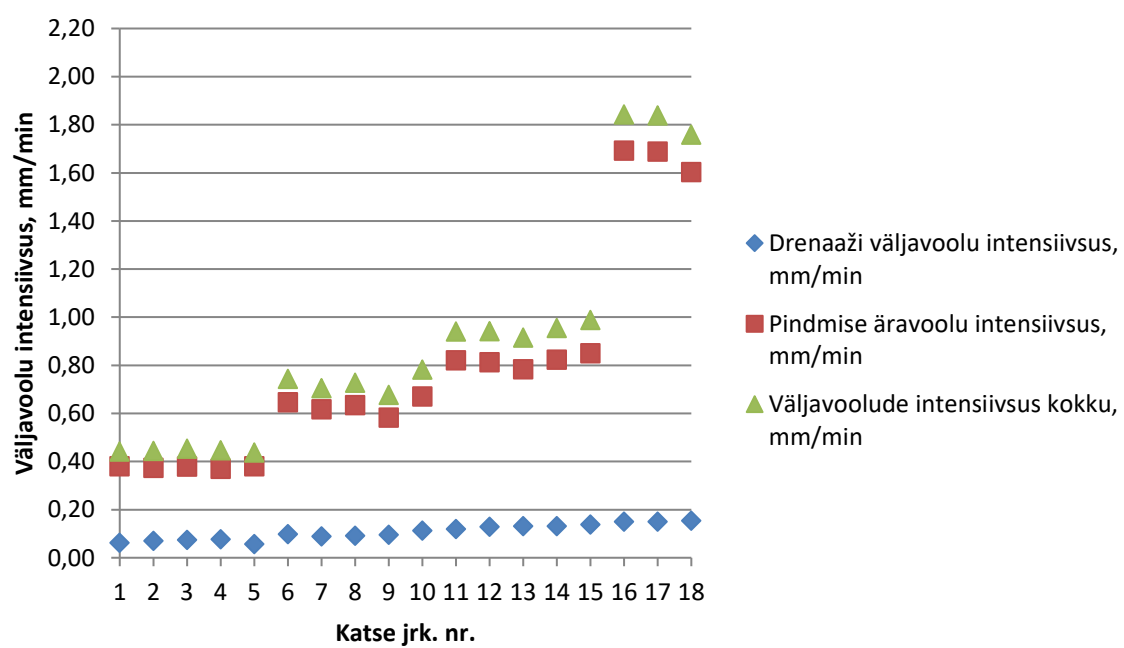


Joonis 6.5. Mõõtmistulemused nõlvusel 1:3.

Nõlvusel 1:2 tekkis pindmine äravool juba 10 minuti jooksul peale katse algust, drenaaži väljavool hakkas tööle 8 minutit hiljem. Pindmise äravoolu kaudu väljuv vesi oli jällegi rohke pinnasega segunenud, kogu katse vältel ummistusid ka torud mõned korrad. Kõikide intensiivsustega jätkus pinnase ärakanne koos veega. Erosiooni mõjul hakkas nähtavale tulema pinnasesse segatud liiv, mida eelnevalt ei olnud silmaga võimalik näha (Joonis 6.6). Suurima intensiivsusega katsetades oli võimalik mõõta 3 korda pindmist väljavoolu enne, kui torud ummistusid. Jagunemine oli sarnane eelneva nõlvusega, enamus tekitatud vihmast ei jõudnud läbi katematerjali, vaid voolas mööda pinda välja, drenaaži osakaal oli minimaalne (Joonis 6.7). Selle nõlvuse juures täheldati vaheäravoolu teket, mis oli aga minimaalne. Kui katsed nõlvuse 1:2 juures kestis 2 tundi ja 20 minutit, siis selle ajaga voolas vaheäravoolu anumasse kõigest 188 ml vett. Võrdluseks, kõige väiksema vihmaintensiivsusega drenaaži kihist voolas kahe minuti jooksul võrdväärne kogus vett.

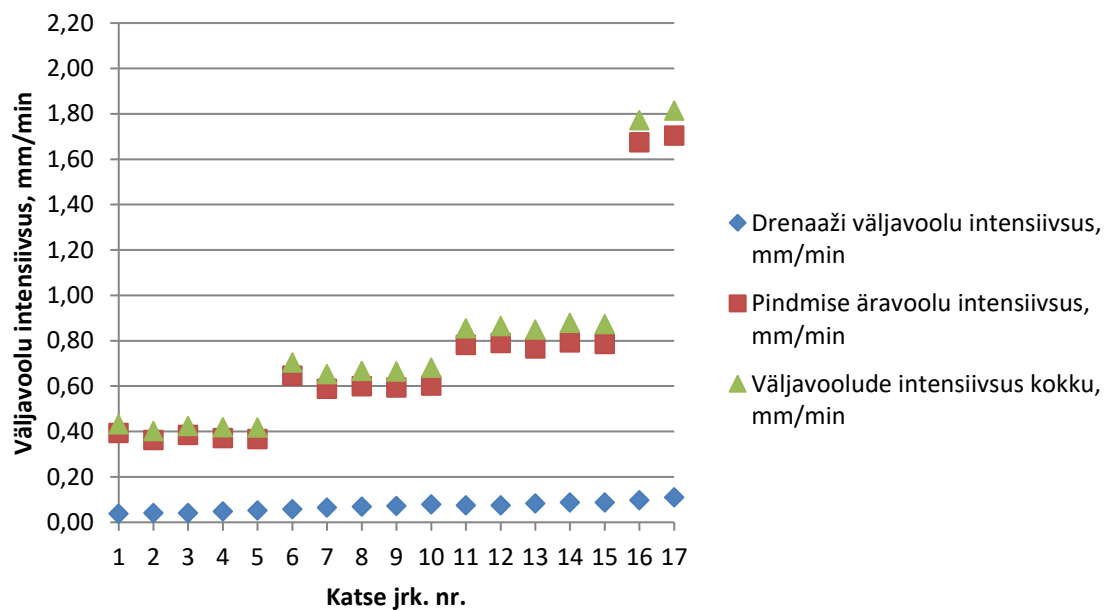


Joonis 6.6. Pinnase erosioon anaeroobselt kääritatud kompostmaterjalil.



Joonis 6.7. Mõõtmistulemused nõlvusel 1:2.

Nõlvusel 1:1,5 tekkis pindmine äravool põhimõtteliselt kohe katse algul, 2 minutit peale alustamist oli väljavoolu hulk juba mõõdetav. Ka drenaaž hakkas umbes samal ajal tööle. Jällegi oli märgatav pinnase ärakanne koos pindmise äravooluga. Erinevusi eelmise nõlvusega ei täheldatud, vooluhulgad olid samas suurusjärgus (Joonis 6.8). Välja võib tuua vaheäravoolu suurenemist, 85 minuti jooksul voolas anumasse 437 ml vett.



Joonis 6.8. Mõõtmistulemused nõlvusel 1:1,5.

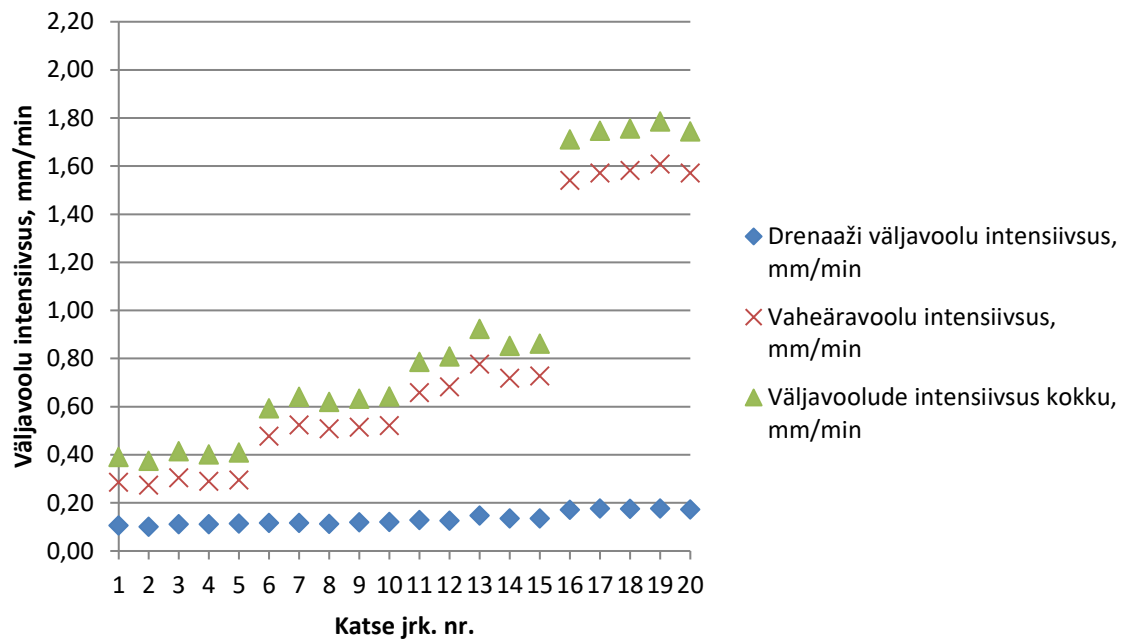
6.3. Aunkompostmaterjali katsed

Järgmised katsed teostati aunkompostiga (Joonis 6.9). Juba materjali paigaldamisel oli selge, et järgmisena katsetatav materjal on omadustel suuresti teistsugune ning katsetulemused võivad oluliselt erineda. Aunkompost on väga kerge, struktuurne ning ei ole sarnane tavapäraselt looduses esineva huumuskihiga. Nõlvakasti paigaldati ca 10 cm kiht kattematerjali ning alustati katseid nõlvusel 1:3 madalaima vihmaintensiivsusega.



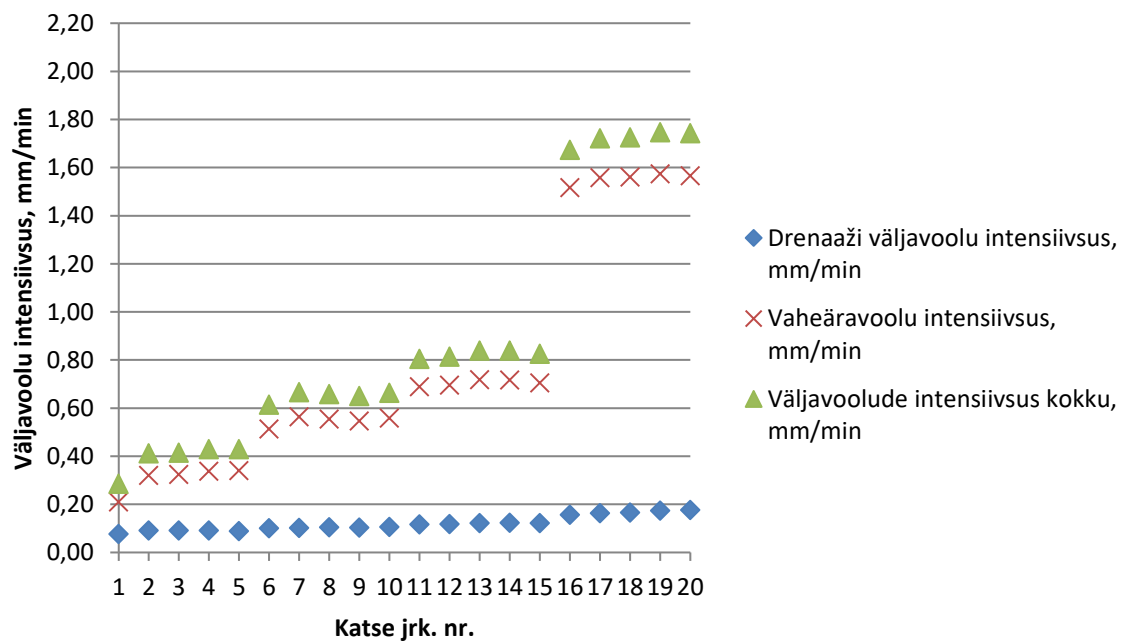
Joonis 6.9. Aunkompost.

Nõlvusel 1:3 intensiivsusega 0,7 mm/min alustades tekkis esimesena drenaaži väljavool 26 minutit pärast alustamist. Järgmisena hakkas 16 minuti pärast tööle vaheäravool liivpinna ning kattematerjali vahelt, mis kiiresti muutus ka domineerivaks väljavooluks. Kõik 1:3 nõlvuse katsed kestsid ajaliselt kokku 5 tundi ja 30 minutit. Selle aja jooksul ei tekkinud pindmist äravoolu ning märke pinnase erosioonist ei olnud. Kogu tekitatud vihm imbus kiiresti kattekihist läbi ning kastist välja vaheäravoolu kaudu, vähesel määral jõudis vesi ka drenaažikihti (Joonis 6.10).



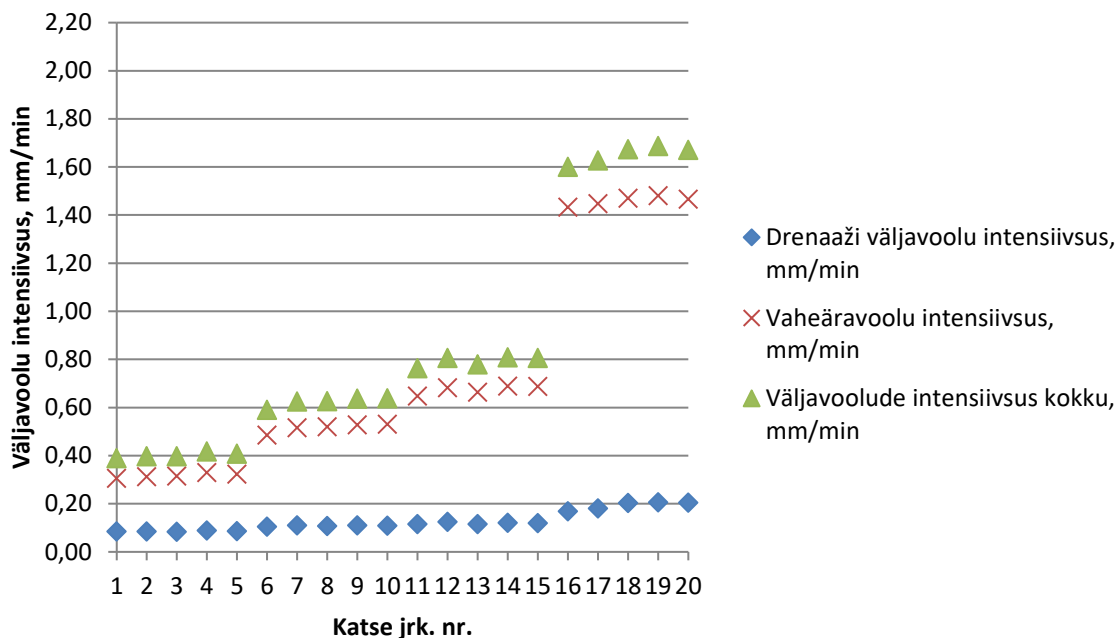
Joonis 6.10. Mõõtmistulemused nõlvusel 1:3.

1:2 nõlvuse juures hakkasid drenaaži ning vaheäravool tööle suhteliselt samal ajal, umbes 23 minutit peale katse algust. Katsetel polnud täheldada pinnale vee tekkimist ühegi intensiivsuse juures, pinnase erosioon puudus. Jällegi voolas kogu tekitatud vihm välja läbi vaheäravoolu ning drenaažikihi (Joonis 6.11). Katsed kestsid kokku 3 tundi.



Joonis 6.11. Mõõtmistulemused nõlvusel 1:2.

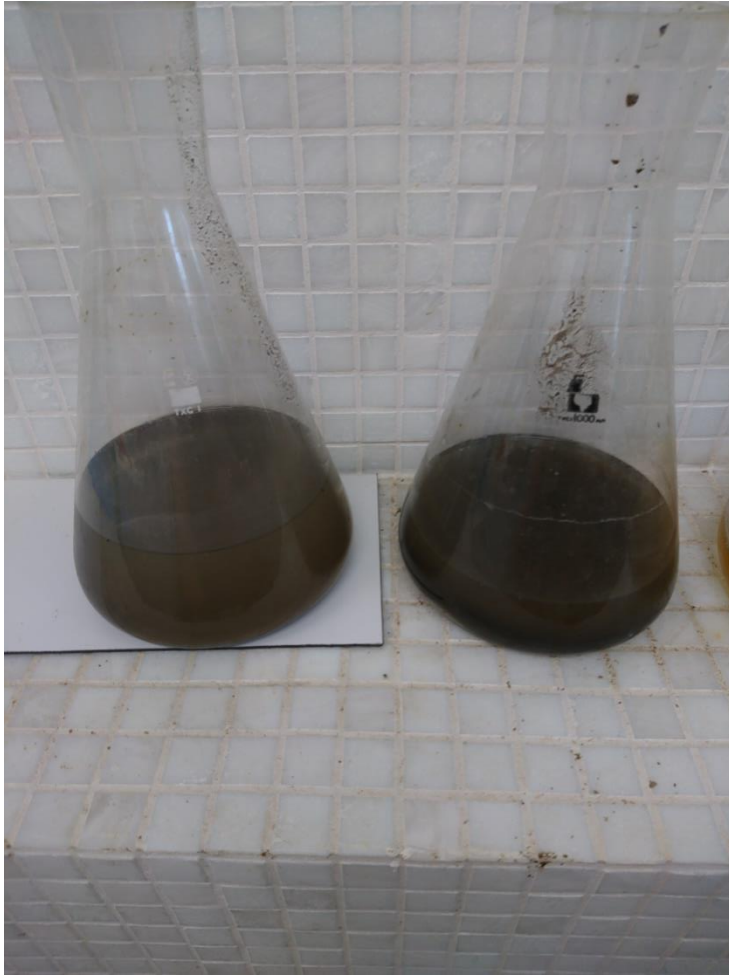
Katsed nõlvusel 1:1,5 ei näidanud jällegi märke pinnaseerosioonist, tulemused ühtisid eelmiste nõlvustega. Pindmist äravoolu ei tekkinud, kogu vihm voolas välja läbi vaheäravoolu ning drenaaži kihi (Joonis 6.12). Nõlvusel 1:1,5 kestsid katsed kokku 3 tundi.



Joonis 6.12. Mõõtmistulemused nõlvusel 1:1,5.

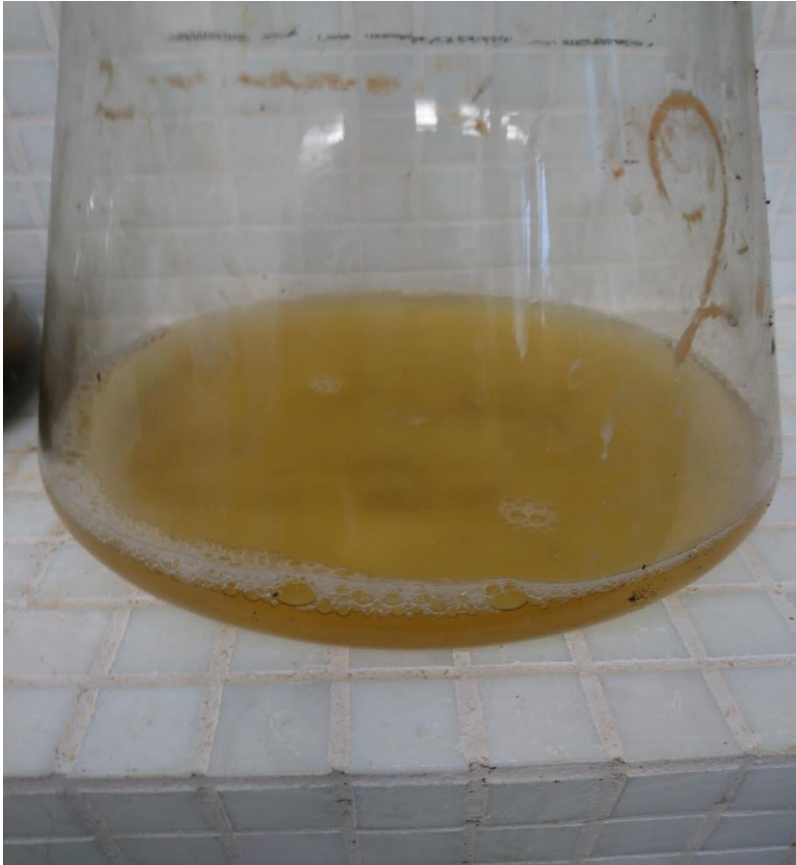
6.4. Kattematerjalide katsetulemuste analüüs

Katsete tulemusena selgus, et katsetatavad kattematerjalid on väga erinevate veeläbilaskvuse omadustega. Anaeroobselt kääritatud kompost koosnes tarnija sõnul 1/3 reoveesettemudast, 1/3 turbast ning 1/3 liivast. Kui liivosa polnud algul märgata, siis katsete jooksul pesi vihm pinnasest välja muda ning turba ja liivosa hakkas järjest rohkem nähtavale tulema. Pindmise äravoolukaudu väljavoolav vesi oli musta värvi ning näha oli suur pinnaseosakeste osakaal vees (Joonis 6.13). Täheldada oli pinnavee kiiret teket ehk KSat seadme katsest saadud filtratsioonimoodul 1,8 cm/d peab paika ka erosioonisimulaatori katsetel. Tulemuste põhjal võib väita, et antud pinnas on kattematerjalina väga haavatav sademete poolt põhjustatud pinnaseerosiooni suhtes. Tuleb märkida, et antud töös teostati katsed palja pinnasega. Kuna reoveesetekompostiga kasvab murukate märgatavalt kiiremini, võib murukattega kompostil olla teistsugused omadused.



Joonis 6.13. Anaeroobselt kääritatud komposti pindmise äravoolu vesi.

Aunkompost ei meenutanud juba paigaldades tüüpilist muldpinnast. Tegu oli väga kerge materjaliga, mis koosnes visuaalselt suurtest saepuru tükkidest ning paljudest kividest. Veeläbilaskvus omadustelt on pinnas sarnane pigem killustikmaterjaliga, kui tüüpilise mullaga, vihmavesi “kukub” otse läbi pinnase. Kuna aluspinnase materjal on antud kattematerjalist oluliselt väiksema veeläbilaskvusega, tekkiski katsetades vaheäravool liivpinnase ning kattematerjali vahelt. Vaheäravoolust voolav vesi oli peaaegu täiesti puhas, pinnaseosakesi mõõteanumates ei täheldatud (Joonis 6.14). Käesolevas töös teostatud katsete tulemusena saab väita, et aunkomposti võiks sobida nõlvakattematerjalina eeltoodud tingimustele vastavates olukordades paremini.



Joonis 6.14. Aunkomposti vaheäravoolu vesi.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli projekteerida ning ehitada laboritingimustesse erosioonisimulaator 2,0 x 0,6 m katsealaga ning vihasimulaator, mida oleks võimalik kasutada õppe-eesmärkidel ning teadustööks. Erosioonisimulaator on ehitatud imiteerimaks tee äärset nõlva. Valmis ehitatud simulaatorit katsetati erinevate nõlvakattematerjalidega, et hinnata simulaatori töötamist ning analüüsida pinnastele vihmavee poolt tekitatud erosiooni protsesse.

Vihmasimulaatori düüsidenä kasutati uduvihmuteid, mis on uus lahendus vihasimulaatoril kasutamiseks, sest analoogseid lahendusi teaduskirjandusest ei leitud. Uduvihmuti kasutamise eeliseks on nende väike vooluhulk, mistõttu on neid vaja kasutada suurel hulgal, et saavutada vajalik vihmaintensiivsus. Suure koguse vihmutitega on aga kergem saavutada ühtlast vihma jaotust kogu katsealale. Uduvihmuti peab vihasimulaatoris kasutamiseks olema kombineeritud tilka tekitava vahekraaniga, antud töös kasutati selleks plastikust harjasmatti. Töö raames arvutati vajalik uduvihmutite kogus ning simulaatorit katsetati ning täiustati. Ühtlane jaotus arvutati Christianseni ühtlase jaotuse koefitsiendiga (*coefficient of uniformity*) ja leiti, et vihma jaotus on hea. Vihmasimulaator saavutab madalamaid vihmaintensiivsusi solenoidklapi abil, mille lahti- ning kinnioleku perioode saab reguleerida spetsiaalselt valmistatud kontrolleri abil.

Erosioonisimulaator konstrueeriti kiigu põhimõttel. Simulaatori maksimaalne reguleeritav nõlvus on 1:1. Nõlvuse reguleerimine toimub käsivintsi abil, mis on kinnitatud aluskonstruksiooni külge. Nõlvakast on ehitatud filmivineerist ning hermeetiliselt suletud, et tagada vee väljavool vaid ettenähtud kohtadest. Kastile on tehtud väljavoolud drenaažikihi, aluspinnase ning kattematerjali vahelisele vaheäravoolule ning pindmisele äravoolule. Väljavoolava vee jagunemise alusel saab analüüsida erinevate kattematerjalide käitumist varieeruvate vihmaintensiivsuste ning nõlvuste korral. Kastis olev drenaažikiht on arvutatud konkreetse töös kasutatud aluspinnase jaoks, muude aluspinnaste kasutamisel tuleks hinnata olemasoleva drenaažikihi sobivust.

Käesoleva töö raames katsetati erosioonisimulaatoriga kokku kolme erinevat pinnast: aluspinnas kivise liiva näol ning kahte erinevat nõlvakattematerjali: reoveesetekompost mis on saadud anaeroobse kääritamise teel ning aunkompost, mis olid omadustelt väga

erinevad. Teostati katsed erinevate nõlvuste ning vihmaintensiivsuste korral ning analüüsi saadud tulemusi. Anaeroobselt kääritatud kompostile tekkis kiiresti pinnale vesi ning sai mõõta pindmist äravoolu ning drenaažikihti jõudvat vee hulka. Sellel pinnasel tekkis koos pindmise äravooluga märgatav pinnase erosioon, kus vihmavesi uhtus ära reoveesettemuda ning turbaosakesi. Aunkompost materjalil on aga kordades kõrgema veeläbilaskvus ning pinnaerosiooni teostatud katsetega ei täheldatud. Kogu tekitatud vihm infitreerus ja muutus peamiselt vaheäravooluks.

Valmishitatud vihmasimulaator ning erosioonisimulaator asub Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudi maaehituse ja veemajanduse õppetooli laboris D169 ning on valmis kasutamiseks õppetöös või uurimuste teostamiseks.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S. et al.** (2012). A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume - *Catena*. Nr 98, lk 63-72.
- Astover, A., Kölli, R., Roostalu, H., Reintam, E., Leedu, E.** (2012). Mullateadus. Tartu: Eesti Maaülikool. 486 lk.
- Bakr, N., Weindorf, D. C., Zhu, Y., Arceneaux, A. E., Selim, H. M.** (2012). Evaluation of compost/mulch as highway embankment erosion control in louisiana at the plot-scale: lk 257-267.
- Carvalho, S. C. P., de Lima, J. L. M. P., de Lima, M. I. P.** (2014). Using meshes to change the characteristics of simulated rainfall produced by spray nozzles - *International Soil and Water Conservation Research*. Nr 2, lk 67-78.
- Cerdá, A.** (1999). A review of the rainfall simulators and its applications to the geomorphology - *Cuadernos De Investigación Geográfica*. Nr 25, lk 22-28.
- Cerdà, A., Ibáñez, S., Calvo, A.** (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain - *Soil Technology*. Nr 11, lk 163-170.
- Christiansen, J. E.** (1941). The uniformity of application of water by sprinkler systems - *Agricultural Engineering*. Nr 22, lk 89-92.
- De Oña, J., Ferrer, A., Osorio, F.** (2011). Erosion and vegetation cover in road slopes hydroseeded with sewage sludge - *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Nr 16, lk 465-468.
- DuPont Typar Geosynthetics.** (2016). Typar SF technical handbook.
<http://www.dupont.co.uk/content/dam/dupont/products-and-services/construction-materials/geotextiles/documents/Typar-UK/Typar-UK-brochure/Typar-UK-technical-handbook.pdf> (11.05.2018).
- Govers G., Everaert W., Poesen J., Rauws G., De, P. J., Lautridou, J. P.** (1990). A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion - *Earth Surface Processes and Landforms*. Nr 15, lk 313-328.
- Grismer, M.** (2012). Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion.- *California Agriculture*. Nr 66, lk 102-107.
- Hudson, N. W.** (1993). Field measurement of soil erosion and runoff. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 139 lk.
- Iserloh, T., Ries, J. B., Arnáez, J. et al.** (2013). European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics - *Catena*. Nr 110, lk 100-112.
- Jaaniso, V.** (2011). Pinnasemehaania. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 247 lk.
- Leppik, V.** (2012). Geotehnika laboratoorsed tööd: Tartu: Eesti Maaülikool.

- Lora, M., Camporese, M., Salandin, P.** (2016). Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments - *Catena*. Nr 140, lk 77-89.
- Maanteeamet. (2006). Geosünteedide kasutamise juhised.
https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/projekterimine/geosynteedide_kasutamise_juhis.pdf (11.05.2018).
- Keskkonnasõnaraamat. (2004). /Toim. Maastik, A.
<https://mot.kielikone.fi/mot/indic/netmot.exe?UI=ened> (16.05.2018).
- Maastik, A., Haldre, H., Koppel, T., Paal, L.** (1995). Hüdraulika ja pumbad. Tartu: Greif. 467 lk.
- Meter Group. (2018). Operation manual KSAT. <https://metergroup-83d0.kxcdn.com/app/uploads/2017/09/KSAT-Manual-2017-10.pdf> (04.05.2018).
- Netafim. (2018). CoolNet pro andmeleht.
<http://www.netafim.fr/Data/Uploads/140505%20%20CoolNet%20Pro.pdf> (27.04.2018).
- Oja, I.** (2014). Vihmastendi projekteerimine ja katsetamine (Magistritöö).
<https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/1769>
- Rankilor, P. R.** (1994). UTF geosynthetics manual. Manchester: Manstock Geotechnical Consultancy Services Ltd. 287 lk.
- Riigi Ilmateenistus. (2018). Sademete rekordid.
<https://www.ilmateenistus.ee/kliima/rekordid/sademed/> (08.05.2018).
- Vlotman, W. F., Willardson, L. S., Dierickx, W.** (2000). Envelope design for subsurface drains. . Wageningen, Holland: International Institute for Land Reclamation and Improvement. 380 lk.
- Wavin. (2006). Stabidrain.
<https://www.idrrim.com/ressources/publications/1/131,STABIDRAIN.pdf> (11.05.2018).
- Zachar, D.** (1982). Chapter 2 : Classification of soil erosion - *Developments in Soil Science*. Nr 10, lk 27-136.

LISAD

Lisa 1. Vihmasimulaatori raami materjalide loetelu.

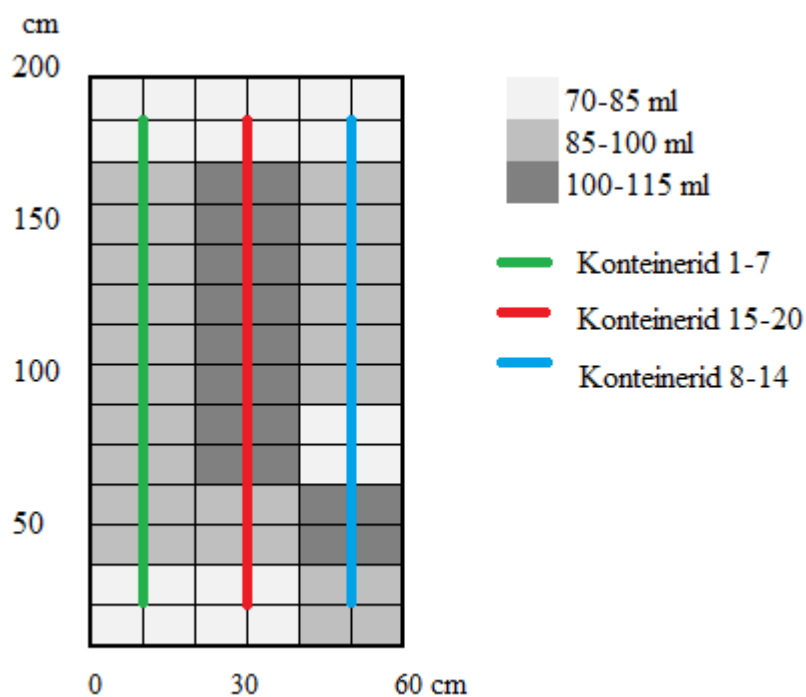
Jrk nr	Tootekood	Toote nimetus	Arv, tk	Pikkus, mm	Ristlõige, mm	Kokku, mm
1	MINITEC 20.1124/0	Al. profiil 30x30 2G	4	562,5	30x30	2250,0
1.1	MINITEC 20.1124/0	Al. profiil 30x30 2G	7	700,0	30x30	4900,0
1.2	MINITEC 20.1124/0	Al. profiil 30x30 2G	4	2100,0	30x30	8400,0
2	MINITEC 20.1139/0	Al. profiil 30x30 1G	5	502,5	30x30	2512,5
3	MINITEC 21.2110/1	Strengthening element 30	8	710,6	30x30	5685,1
4	MINITEC 21.0016/0	Power-lock Fastener SF 30	16		Kokku :	23747,6
5	MINITEC 21.1385/0	Screw connection 30 N	12			

Lisa 2. Toruarmatuuri loetelu.

Jrk nr	Toote nimetus	Arv	Ühik
1	Aiavoolik De 19 mm	10	m
2	Messing nippel 3/4"	2	tk
3	Messing muhv 3/4" – 1/2"	3	tk
4	Veearvesti Zenner 1/2"	1	tk
5	Solenoidklapp 12V, 1/2"	1	tk
6	Kuulkraan VK/SK 3/4"	1	tk
7	Messing kolmik ahenev 3/4"-1/2"-3/4"	1	tk
8	Manomeeter, 0-6 bar, alt ühendus 1/2"	1	tk
9	PE 100 PN 16 survetoru De 25	8	m
10	PE mehaaniline liitmik, põlv 90°	5	tk
11	PE mehaaniline liitmik, kolmik 25x25x25	1	tk
12	PE mehaaniline liitmik, 25x3/4" VK	1	tk

Lisa 3. Ühtlase jaotuse leidmise katseraport ning joonis.

Katse nr 1	Aeg	6	min				
Pihustid	Nurk	ligi 90	°				
	Kaugus	35	cm				
	Kõrgus	50	cm				
Karbi nr	7	6	5	4	3	2	1
Maht (ml)	73,69	97,33	107,98	89,11	95,05	97,45	71,74
z-m	18,54	5,10	15,75	3,12	2,82	5,22	20,49
Karbi nr	20	19	18	17	16	15	
Maht (ml)	75,84	86,22	107,17	107,26	110,93	106,83	
z-m	16,39	6,01	14,94	15,03	18,70	14,60	
Karbi nr	14	13	12	11	10	9	8
Maht (ml)	87,17	104,81	72,29	89,11	98,75	88,75	77,11
z-m	5,06	12,58	19,94	3,12	6,52	3,48	15,12
m=	92,23	ml					
$\Sigma (z-m) =$	222,53	ml					
CU	87,94	%					



Lisa 4. Aluspinnase erosioonisimulaatori katsed.

Katse nr.	Jrk. nr	Kestus, s	Drenaaži maht, ml	Q _{drenaaž} , l/s	Q _{drenaaž} , l/min	I _{drenaaž} , mm/min
1	1	120	1076,49	0,0090	0,54	0,41
Intensiivsus - 0,47 mm/min	2	120	1057,25	0,0088	0,53	0,41
	3	120	1182,94	0,0099	0,59	0,45
	4	120	1108,13	0,0092	0,55	0,43
	5	120	1089,92	0,0091	0,54	0,42
2	6	120	1072,36	0,0089	0,54	0,41
Intensiivsus - 0,70 mm/min	7	120	964,57	0,0080	0,48	0,37
	8	120	1063,71	0,0089	0,53	0,41
	9	120	965,91	0,0080	0,48	0,37
	10	120	889,07	0,0074	0,44	0,34
3	11	120	868,32	0,0072	0,43	0,33
Intensiivsus - 1,11 mm/min	12	120	816,71	0,0068	0,41	0,31
	13	120	813,43	0,0068	0,41	0,31
	14	120	744,18	0,0062	0,37	0,29
	15	120	753,76	0,0063	0,38	0,29

Lisa 5. Vihmasimulaatori katsetulemuste koondtabel.

Katse nr	Töörõhk, bar	Solenoidklapp		Suhe	CU, %	Veearvestinäit 1 min, m3	Veearvestinäit 6 min, m3	W _{5min} , l	Q, l/s	Q, l/min	Pindala tegur	Q _{teg} , l/min	Intensiivsus mm/min
		Lahti, s	Kinni, s										
1	3	Avatud	Avatud	0	87.94	0.06684	0.08382	16.98	0.057	3.40	0.88	3.00	2.31
2	3	2.840	6.080	2.14	82.55	0.08660	0.09667	10.07	0.034	2.01	0.88	1.78	1.37
3	3	2.840	7.460	2.63	81.48	0.10494	0.11336	8.42	0.028	1.68	0.88	1.49	1.15
4	3	2.840	9.420	3.32	83.70	0.11452	0.12164	7.12	0.024	1.42	0.88	1.26	0.97
5	3	2.840	11.120	3.92	80.90	0.12277	0.12900	6.23	0.021	1.25	0.88	1.10	0.85
6	3	2.840	13.240	4.66	81.69	0.12976	0.13500	5.24	0.017	1.05	0.88	0.93	0.71
7	3	2.060	4.020	1.95	83.81	0.13792	0.14976	11.84	0.039	2.37	0.88	2.09	1.61
8	3	2.060	5.640	2.74	79.23	0.15132	0.16024	8.92	0.030	1.78	0.88	1.58	1.21
9	3	2.060	7.520	3.65	84.97	0.16172	0.16930	7.58	0.025	1.52	0.88	1.34	1.03
10	3	2.060	9.660	4.69	83.52	0.17028	0.17620	5.92	0.020	1.18	0.88	1.05	0.81
11	3	2.060	11.400	5.53	81.39	0.17718	0.18254	5.36	0.018	1.07	0.88	0.95	0.73
12	3	1.220	2.010	1.65	81.15	0.18738	0.20248	15.10	0.050	3.02	0.88	2.67	2.05
13	3	1.220	3.620	2.97	83.82	0.20438	0.21702	12.64	0.042	2.53	0.88	2.24	1.72
14	3	1.220	5.580	4.57	83.59	0.21858	0.22762	9.04	0.030	1.81	0.88	1.60	1.23
15	3	1.220	7.720	6.33	79.93	0.22832	0.23522	6.90	0.023	1.38	0.88	1.22	0.94
16	3	1.220	9.740	7.98	79.96	0.23622	0.24132	5.10	0.017	1.02	0.88	0.90	0.69

Lisa 6. Tegelikult intensiivsuse leidmine, veekao arvutamine.

Nõlvus 1:3, vihma intensiivsus	Aeg	Katse nr.	Kestus	Pindmine äravool maht, ml	Pindmine vooluhulk l/s	Pindminevooluhulk l/min	Veearvesti vooluhulk l/min	Efektiivne intensiivsus mm/min	Veearvesti intensiivsus, mm/min	Vahe, Q	Vahe, I	Keskmine vihmaintensiivsuse kadu, mm/min
Intensiivsus 0,81 mm/min	15:16:26	1	120	1385	0,0115	0,693	0,876	0,533	0,67	0,183	0,141	
	15:19:42	2	120	1481	0,0123	0,741	0,902	0,570	0,69	0,162	0,124	KESKMINE
	15:33:21	3	120	1367	0,0114	0,684	0,929	0,526	0,71	0,245	0,189	0,151
Intensiivsus 1,21 mm/min	16:15:12	4	120	2203	0,0184	1,102	1,424	0,847	1,10	0,323	0,248	
	16:20:02	5	120	2166	0,0181	1,083	1,442	0,833	1,11	0,359	0,276	KESKMINE
	16:24:42	6	120	2112	0,0176	1,056	1,406	0,812	1,08	0,350	0,269	0,265
Intensiivsus 1,61 mm/min	16:30:09	7	120	2663	0,0222	1,332	1,769	1,024	1,36	0,438	0,337	
	16:33:33	8	120	2869	0,0239	1,435	1,804	1,103	1,39	0,370	0,285	KESKMINE
	16:37:01	9	120	2816	0,0235	1,408	1,734	1,083	1,33	0,326	0,250	0,290
Intensiivsus 2,31 mm/min	16:41:30	10	120	4559	0,0380	2,280	2,654	1,753	2,04	0,374	0,288	
	16:44:50	11	120	4881	0,0407	2,441	2,618	1,877	2,01	0,178	0,137	KESKMINE
	16:47:20	12	120	4492	0,0374	2,246	2,565	1,727	1,97	0,319	0,245	0,223
Nõlvus 1:2, vihma intensiivsus	Aeg	Katse nr.	Kestus	Pindmine äravool maht, ml	Pindmine vooluhulk l/s	Pindminevooluhulk l/min	Veearvesti vooluhulk l/min	Efektiivne intensiivsus mm/min	Veearvesti intensiivsus, mm/min	Vahe, Q	Vahe, I	Keskmine vihmaintensiivsuse kadu, mm/min
Intensiivsus 0,81 mm/min	17:09:41	1	120	1349	0,0112	0,675	0,902	0,519	0,69	0,228	0,175	
	17:13:11	2	120	1379	0,0115	0,690	0,902	0,530	0,69	0,213	0,164	KESKMINE
	17:16:48	3	120	1398	0,0117	0,699	0,973	0,538	0,75	0,274	0,211	0,183
Intensiivsus 1,21 mm/min	17:22:45	4	120	2073	0,0173	1,037	1,389	0,797	1,07	0,352	0,271	
	17:26:25	5	120	1975	0,0165	0,988	1,283	0,759	0,99	0,295	0,227	KESKMINE
	17:29:38	6	120	1964	0,0164	1,071	1,418	0,824	1,09	0,347	0,267	0,255
Intensiivsus 1,61 mm/min	17:34:12	7	120	2527	0,0211	1,264	1,716	0,972	1,32	0,452	0,348	
	17:37:36	8	120	2547	0,0212	1,274	1,769	0,979	1,36	0,496	0,381	KESKMINE
	17:40:53	9	120	2525	0,0210	1,263	1,734	0,971	1,33	0,471	0,362	0,364
Intensiivsus 2,31 mm/min	17:44:51	10	120	4367	0,0364	2,184	2,574	1,679	1,98	0,390	0,300	
	17:48:09	11	120	4363	0,0364	2,182	2,583	1,678	1,99	0,401	0,309	KESKMINE
	17:51:29	12	120	4357	0,0363	2,179	2,609	1,676	2,01	0,431	0,331	0,313
Nõlvus 1:1,5, vihma intensiivsus	Aeg	Katse nr.	Kestus	Pindmine äravool maht, ml	Pindmine vooluhulk l/s	Pindminevooluhulk l/min	Veearvesti vooluhulk l/min	Efektiivne intensiivsus mm/min	Veearvesti intensiivsus, mm/min	Vahe, Q	Vahe, I	Keskmine vihmaintensiivsuse kadu, mm/min
Intensiivsus 0,81 mm/min	17:58:09	1	120	1237	0,0103	0,619	0,920	0,476	0,71	0,301	0,232	
	18:03:54	2	120	1197	0,0100	0,599	0,840	0,460	0,65	0,242	0,186	KESKMINE
	18:08:05	3	120	1226	0,0102	0,613	0,902	0,471	0,69	0,289	0,222	0,213
Intensiivsus 1,21 mm/min	18:13:04	4	120	1945	0,0162	0,973	1,371	0,748	1,05	0,399	0,306	
	18:16:30	5	120	1949	0,0162	0,975	1,371	0,750	1,05	0,397	0,305	KESKMINE
	18:20:03	6	120	1964	0,0164	0,982	1,415	0,755	1,09	0,433	0,333	0,315
Intensiivsus 1,61 mm/min	18:24:20	7	120	2517	0,0210	1,259	1,787	0,968	1,37	0,528	0,406	
	18:28:00	8	120	2392	0,0199	1,196	1,725	0,920	1,33	0,529	0,407	KESKMINE
	18:31:42	9	120	2459	0,0205	1,230	1,725	0,946	1,33	0,495	0,381	0,398
Intensiivsus 2,31 mm/min	18:36:00	10	120	4314	0,0360	2,157	2,671	1,659	2,05	0,514	0,396	
	18:39:23	11	120	4376	0,0365	2,188	2,680	1,683	2,06	0,492	0,378	KESKMINE
	18:44:17	12	120	4347	0,0362	2,174	2,654	1,672	2,04	0,480	0,369	0,381

Lisa 7. Erosioonisimulaatori katsetulemused, Anaeroobselt kääritatud kompost.

Nõlvus 1:3

Algus 19:14:06

Drenaaži teke 19:36:15

Pindmise äravoolu teke 19:35:54

Drenaaži ühtlustumine 20:34:30

Pindmise äravoolu ühtlustumine 20:34:30

Katse jrk. nr.	Aeg,	Katse nr.	Kestus	Drenaaži maht, ml	Pindimine äravool maht, ml	Vaheäravo ol, ml	Drenaaži vooluhulk l/s	Drenaaži vooluhulk l/min	Intensiivsus mm/min	Pindmine vooluhulk l/s	Pindmine vooluhulk l/min	Intensiivsus mm/min	Intensiivsus kokku
1	20:25:09	Algus 19:14:06	120	69,81	1133,91		0,0006	0,035	0,027	0,0094	0,567	0,436	0,463
2	20:29:15	Intensiivsus	120	79,79	1119,08		0,0007	0,040	0,031	0,0093	0,560	0,430	0,461
3	20:32:30	0.70 mm/min	120	176,18	1127,09		0,0015	0,088	0,068	0,0094	0,564	0,433	0,501
4	20:36:10		120	128,95	1152,41		0,0011	0,064	0,050	0,0096	0,576	0,443	0,493
5	20:39:30		120	156,42	1184,33		0,0013	0,078	0,060	0,0099	0,592	0,455	0,516
6	20:47:58	Algus 20:46:20	120	202,23	1662,95		0,0017	0,101	0,078	0,0139	0,831	0,639	0,717
7	20:51:30	Intensiivsus	120	218,142	1868,09		0,0018	0,109	0,084	0,0156	0,934	0,718	0,802
8	20:54:50	1.11 mm/min	120	236,41	1861,73		0,0020	0,118	0,091	0,0155	0,931	0,716	0,807
9	20:58:20		120	257,61	1812,28		0,0021	0,129	0,099	0,0151	0,906	0,697	0,796
10	21:02:03		120	275,4	1912,54		0,0023	0,138	0,106	0,0159	0,956	0,735	0,841
11	21:20:20	Algus 21:17:56	120	255,2	2353,97		0,0021	0,128	0,098	0,0196	1,177	0,905	1,003
12	21:26:01	Intensiivsus	120	245,2	2372,97		0,0020	0,123	0,094	0,0198	1,186	0,913	1,007
13	21:30:00	1.35 mm/min	120	276,2	2237,97		0,0023	0,138	0,106	0,0186	1,119	0,861	0,967
14	21:32:55		120	299,2	2371,97		0,0025	0,150	0,115	0,0198	1,186	0,912	1,027
15	21:39:10		120	301,2	2155,97		0,0025	0,151	0,116	0,0180	1,078	0,829	0,945
16	22:00:25	Algus 21:59:30	120	482,2	4745,77		0,0040	0,241	0,185	0,0395	2,373	1,825	2,010
		Intensiivsus											
		2.00 mm/min											

Nõlvus 1:2

Algus 07:16:30

Drenaaži teke 07:33:10

Pindmise äravoolu teke 07:25:00

Drenaaži ühtlustumine 08:07:36

Pindmise äravoolu ühtlustumine 08:07:36

Katse jrk. nr.	Aeg	Katse nr.	Kestus	Drenaaži maht, ml	Pindmine äravool maht, ml	Vaheäravo ol, ml	Drenaaži vooluhulk l/s	Drenaaži vooluhulk l/min	Intensiivsus mm/min	Pindmine vooluhulk l/s	Pindmine vooluhulk l/min	Intensiivsus mm/min	Intensiivsus kokku
1	08:07:36		120	149	989		0,0013	0,081	0,062	0,0082	0,494	0,380	0,442
2	08:11:19	Algus 07:16:30	120	161	988		0,0015	0,092	0,070	0,0081	0,487	0,374	0,445
3	08:14:26	Intensiivsus	120	183	973		0,0016	0,097	0,074	0,0082	0,493	0,379	0,453
4	08:17:42	0.7 mm/min	120	193	985		0,0017	0,101	0,077	0,0080	0,481	0,370	0,447
5	08:21:21		120	201	962		0,0012	0,075	0,057	0,0082	0,495	0,380	0,438
6	08:47:15	Algus 08:25:35	120	254	1681		0,0021	0,127	0,098	0,0140	0,841	0,646	0,744
7	08:34:02	Intensiivsus	120	230	1605		0,0019	0,115	0,088	0,0134	0,803	0,617	0,706
8	08:37:26	1.11 mm/min	120	240	1651		0,0020	0,120	0,092	0,0138	0,826	0,635	0,727
9	08:40:27		120	247	1515		0,0021	0,124	0,095	0,0126	0,758	0,583	0,678
10	08:44:15		120	292	1743		0,0024	0,146	0,112	0,0145	0,872	0,670	0,783
11	08:57:50	Algus 08:51:55	120	311	2134		0,0026	0,156	0,120	0,0178	1,067	0,821	0,940
12	09:14:10	Intensiivsus	120	335	2115		0,0028	0,168	0,129	0,0176	1,058	0,813	0,942
13	09:03:52	1.35 mm/min	120	343	2037		0,0029	0,172	0,132	0,0170	1,019	0,783	0,915
14	09:07:35		120	341	2143		0,0028	0,171	0,131	0,0179	1,072	0,824	0,955
15	09:10:52		120	359	2211		0,0030	0,180	0,138	0,0184	1,106	0,850	0,988
16	09:27:13	Algus 09:17:50	120	390	4402		0,0033	0,195	0,150	0,0367	2,201	1,693	1,843
17	09:32:43	Intensiivsus	120	392	4391		0,0033	0,196	0,151	0,0366	2,196	1,689	1,839
18	09:37:30	2.00 mm/min	120	402	4171		0,0034	0,201	0,155	0,0348	2,086	1,604	1,759
			8400			187,97	0,0000	0,001	0,001	0,0000	0,000	0,000	0,001

Nõlvus 1:1,5

Algus 11:36:10

Drenaaži teke 11:36:10

Pindmise äravoolu teke 11:38:00

Drenaaži ühtlustumine 11:42:26

Pindmise äravoolu ühtlustumine 11:42:26

Katse jrk. nr.	Aeg, algus	Katse nr.	Kestus	Drenaaži maht, ml	Pindimne äravool maht, ml	Vaheäravo ol, ml	Drenaaži vooluhulk l/s	Drenaaži vooluhulk l/min	Intensiivsus mm/min	Pindmine vooluhulk l/s	Pindmine vooluhulk l/min	Intensiivsus mm/min	Intensiivsus kokku
1	11:42:26	Algus 11:36:10	120	98	1022		0,0008	0,049	0,038	0,0085	0,511	0,393	0,431
2	11:45:30	Intensiivsus	120	105	941		0,0009	0,053	0,040	0,0078	0,471	0,362	0,402
3	11:48:33	0.70 mm/min	120	106	999		0,0009	0,053	0,041	0,0083	0,500	0,384	0,425
4	11:56:03		120	125	965		0,0010	0,063	0,048	0,0080	0,483	0,371	0,419
5	11:59:34		120	134	952		0,0011	0,067	0,052	0,0079	0,476	0,366	0,418
6	12:05:22	Algus 12:02:55	120	150	1678		0,0013	0,075	0,058	0,0140	0,839	0,645	0,703
7	12:08:43	Intensiivsus	120	167	1529		0,0014	0,084	0,064	0,0127	0,765	0,588	0,652
8	12:12:42	1.11 mm/min	120	178	1558		0,0015	0,089	0,068	0,0130	0,779	0,599	0,668
9	12:15:52		120	186	1542		0,0016	0,093	0,072	0,0129	0,771	0,593	0,665
10	12:22:14		120	206	1564		0,0017	0,103	0,079	0,0130	0,782	0,601	0,681
11	12:30:12	Algus 12:35:42	120	193	2030		0,0016	0,097	0,074	0,0169	1,015	0,781	0,855
12	12:33:38	Intensiivsus	120	194	2055		0,0016	0,097	0,075	0,0171	1,028	0,790	0,865
13	12:42:03	1.35 mm/min	120	214	1992		0,0018	0,107	0,082	0,0166	0,996	0,766	0,848
14	12:45:49		120	226	2059		0,0019	0,113	0,087	0,0172	1,030	0,792	0,879
15	12:49:09		120	228	2043		0,0019	0,114	0,088	0,0170	1,022	0,786	0,873
16	12:55:08	Algus 12:52:12	120	252	4353		0,0021	0,126	0,097	0,0363	2,177	1,674	1,771
17	12:58:45	Intensiivsus	120	287	4429		0,0024	0,144	0,110	0,0369	2,215	1,703	1,814
		2.00 mm/min	5100			436,97	0,0001	0,005	0,004	0,0000	0,000	0,000	0,004

Lisa 8. Erosioonisimulaatori katsetulemused, aunkompost.

Nõlvus 1:3

Algus 16:15:00
 Drenaaži teke 16:41:45
 Vaheäravoolu teke 16:57:50
 Drenaaži ühtlustumine 18:29:17
 Vaheäravoolu ühtlustumine 18:29:17

Katse jrk. nr.	Aeg,	Katse nr.	Kestus	Drenaaži maht, ml	Vaheäravo ol, ml	Drenaaži vooluhulk l/s	Drenaaži vooluhulk l/min	Intensiivsu s mm/min	Vaheäravoolu vooluhulk, l/s	Vaheäravo oli vooluhulk l/min	Vaheärav oolu intensiivsu s mm/min	Intensiivsus kokku
1	18:29:17	Algus 16:15:00	120	276	741	0,0023	0,138	0,106	0,0062	0,371	0,285	0,391
2	18:39:17	Intensiivsus	120	263	711	0,0022	0,132	0,101	0,0059	0,356	0,273	0,375
3	18:42:15	0.7 mm/min	120	290	790	0,0024	0,145	0,112	0,0066	0,395	0,304	0,415
4	18:45:09		120	290	754	0,0024	0,145	0,112	0,0063	0,377	0,290	0,401
5	18:47:55		120	297	766	0,0025	0,149	0,114	0,0064	0,383	0,295	0,409
6	19:02:00	Algus 18:52:00	120	302	1240	0,0025	0,151	0,116	0,0103	0,620	0,477	0,593
7	19:12:00	Intensiivsus	120	304	1363	0,0025	0,152	0,117	0,0114	0,682	0,524	0,641
8	19:22:00	1.11 mm/min	120	292	1320	0,0024	0,146	0,112	0,0110	0,660	0,508	0,620
9	19:26:56		120	309	1338	0,0026	0,155	0,119	0,0112	0,669	0,515	0,633
10	19:29:58		120	313	1356	0,0026	0,157	0,120	0,0113	0,678	0,521	0,642
11	19:43:35	Algus 19:33:35	120	333	1710	0,0028	0,167	0,128	0,0143	0,855	0,658	0,786
12	19:53:35	Intensiivsus	120	329	1773	0,0027	0,165	0,127	0,0148	0,887	0,682	0,808
13	20:10:56	1.35 mm/min	120	382	2018	0,0032	0,191	0,147	0,0168	1,009	0,776	0,923
14	20:13:58		120	350	1868	0,0029	0,175	0,135	0,0156	0,934	0,718	0,853
15	20:17:02		120	351	1890	0,0029	0,176	0,135	0,0158	0,945	0,727	0,862
16	20:29:56	Algus 20:19:00	120	445	4005	0,0037	0,223	0,171	0,0334	2,003	1,540	1,711
17	20:33:06	Intensiivsus	120	458	4084	0,0038	0,229	0,176	0,0340	2,042	1,571	1,747
18	20:36:06	2.00 mm/min	120	455	4112	0,0038	0,228	0,175	0,0343	2,056	1,581	1,756
19	20:39:10		120	460	4183	0,0038	0,230	0,177	0,0349	2,092	1,609	1,785
20	21:42:16		120	449	4085	0,0037	0,225	0,173	0,0340	2,043	1,571	1,744

Nõlvus 1:2

Algus 10:42:50
Drenaaži teke 11:04:25
Vaheäravoolu teke 11:02:10
Drenaaži ühtlustumine 11:22:20
Vaheäravoolu ühtlustumine 11:22:20

Katse jrk. nr.	Aeg	Katse nr.	Kestus	Drenaaži maht, ml	Vaheäravo ol, ml	Drenaaži vooluhulk l/s	Drenaaži vooluhulk l/min	Intensiivs s mm/min	Vaheäravool u vooluhulk, l/s	Vaheäravo oli vooluhulk l/min	Vaheärav oolu vooluhulk mm/min	Intensiivs kokku
1	11:22:20	Algus 10:42:50	120	198	544	0,0017	0,099	0,076	0,0045	0,272	0,209	0,285
2	11:34:25	Intensiivs	120	237	833	0,0020	0,119	0,091	0,0069	0,417	0,320	0,411
3	11:37:15	0.70 mm/min	120	237	842	0,0020	0,119	0,091	0,0070	0,421	0,324	0,415
4	11:40:31		120	239	876	0,0020	0,120	0,092	0,0073	0,438	0,337	0,429
5	11:44:51		120	232	884	0,0019	0,116	0,089	0,0074	0,442	0,340	0,429
6	12:00:50	Algus 11:50:50	120	260	1336	0,0022	0,130	0,100	0,0111	0,668	0,514	0,614
7	12:10:50	Intensiivs	120	266	1467	0,0022	0,133	0,102	0,0122	0,734	0,564	0,666
8	12:20:50	1.11 mm/min	120	271	1442	0,0023	0,136	0,104	0,0120	0,721	0,555	0,659
9	12:24:01		120	269	1421	0,0022	0,135	0,103	0,0118	0,711	0,546	0,650
10	12:26:54		120	276	1451	0,0023	0,138	0,106	0,0121	0,726	0,558	0,664
11	12:40:30	Algus 12:30:30	120	302	1790	0,0025	0,151	0,116	0,0149	0,895	0,688	0,804
12	12:50:30	Intensiivs	120	308	1808	0,0026	0,154	0,118	0,0151	0,904	0,695	0,814
13	12:53:43	1,35 mm/min	120	316	1867	0,0026	0,158	0,122	0,0156	0,934	0,718	0,839
14	12:56:44		120	320	1863	0,0027	0,160	0,123	0,0155	0,932	0,716	0,839
15	12:59:36		120	317	1831	0,0026	0,159	0,122	0,0153	0,916	0,704	0,826
16	13:12:30	Algus 13:02:30	120	408	3945	0,0034	0,204	0,157	0,0329	1,973	1,517	1,674
17	13:22:30	Intensiivs	120	425	4052	0,0035	0,213	0,163	0,0338	2,026	1,558	1,722
18	13:26:05	2.00 mm/min	120	432	4056	0,0036	0,216	0,166	0,0338	2,028	1,560	1,726
19	13:29:57		120	451	4092	0,0038	0,226	0,173	0,0341	2,046	1,574	1,747
20	13:39:57		120	458	4072	0,0038	0,229	0,176	0,0339	2,036	1,566	1,742

Nõlvus 1:1,5

Algus 14:29:00
Drenaaži teke 14:36:21
Vaheäravoolu teke 14:31:30
Drenaaži ühtlustumine 15:06:27
Vaheäravoolu ühtlustumine 15:06:27

81

Katse jrk. nr.	Aeg, algus	Katse nr.	Kestus	Drenaaži maht, ml	Vaheäravo ol, ml	Drenaaži vooluhulk l/s	Drenaaži vooluhulk l/min	Intensiivsu s mm/min	Vaheäravool u vooluhulk, l/s	Vaheäravo oli vooluhulk l/min	Vaheärav oolu vooluhulk mm/min	Intensiivsus kokku
1	15:06:27	Algus 14:29:20	120	220	794	0,0018	0,110	0,085	0,0066	0,397	0,305	0,390
2	15:16:27	Intensiivsus	120	221	812	0,0018	0,111	0,085	0,0068	0,406	0,312	0,397
3	15:26:27	0.8 mm/min	120	216	817	0,0018	0,108	0,083	0,0068	0,409	0,314	0,397
4	15:29:21		120	229	856	0,0019	0,115	0,088	0,0071	0,428	0,329	0,417
5	15:32:22		120	223	838	0,0019	0,112	0,086	0,0070	0,419	0,322	0,408
6	15:45:30	Algus 15:35:30	120	272	1263	0,0023	0,136	0,105	0,0105	0,632	0,486	0,590
7	15:55:30	Intensiivsus	120	284	1340	0,0024	0,142	0,109	0,0112	0,670	0,515	0,625
8	16:05:30	1.21 mm/min	120	279	1351	0,0023	0,140	0,107	0,0113	0,676	0,520	0,627
9	16:08:15		120	284	1372	0,0024	0,142	0,109	0,0114	0,686	0,528	0,637
10	16:11:34		120	282	1378	0,0024	0,141	0,108	0,0115	0,689	0,530	0,638
11	16:27:30	Algus 16:17:30	120	300	1683	0,0025	0,150	0,115	0,0140	0,842	0,647	0,763
12	16:37:30	Intensiivsus	120	324	1772	0,0027	0,162	0,125	0,0148	0,886	0,681	0,806
13	16:47:30	1.61 mm/min	120	300	1725	0,0025	0,150	0,115	0,0144	0,863	0,663	0,779
14	16:50:12		120	312	1791	0,0026	0,156	0,120	0,0149	0,896	0,689	0,809
15	16:52:53		120	310	1787	0,0026	0,155	0,119	0,0149	0,894	0,687	0,806
16	17:05:30	Algus 16:55:40	120	437	3726	0,0036	0,219	0,168	0,0311	1,863	1,433	1,601
17	17:15:30	Intensiivsus	120	468	3764	0,0039	0,234	0,180	0,0314	1,882	1,447	1,627
18	17:19:36	2.20 mm/min	120	528	3823	0,0044	0,264	0,203	0,0319	1,912	1,470	1,673
19	17:23:50		120	536	3849	0,0045	0,268	0,206	0,0321	1,925	1,480	1,686
20	17:27:04		120	532	3812	0,0044	0,266	0,205	0,0318	1,906	1,466	1,671

Lisa 9. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.

Mina, Jaan Vagula,
(sünnipäev pp/kuu/aa 04.11.1992)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Teenõlvakatte erosioonisimulaatori projekteerimine ja katsetamine, mille juhendaja on Toomas Tamm,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 28.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)